



TUGAS AKHIR - SF 184801

**PERILAKU OKSIDASI PADUAN AMORF BERBASIS
ZIRKONIUM PADA TEMPERATUR 400-450 °C**

**Romdhoni Graha Pribadi
NRP 01111440000040**

**Dosen Pembimbing
Dr.rer.nat. Triwikantoro, M.Si.**

**Departemen Fisika
Fakultas Sains
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019**



FINAL PROJECT - SF 184801

OXIDATION BEHAVIOUR OF ZIRCONIUM BASED AMORPHOUS ALLOYS AT 400-450 °C

Romdhoni Graha Pribadi
NRP 01111440000040

Advisor
Dr.rer.nat. Triwikantoro, M.Si

Department of Physics
Faculty of Sains
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2019

**PERILAKU OKSIDASI PADUAN AMORF BERBASIS
ZIRKONIUM PADA TEMPERATUR 400-450 °C**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Sains
pada
Bidang Minat Fisika Material
Program Studi S-1 Departemen Fisika
Fakultas Sains
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

Romdhoni Graha Pribadi
NRP 0111144000040

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir

Dr.rer.nat. Triwikantoro, M.Si.
NIP. 19660114199202.1.001



Surabaya, 23 Januari 2019



“Halaman ini sengaja dikosongkan”

PERILAKU OKSIDASI PADUAN AMORF BERBASIS ZIRKONIUM PADA TEMPERATUR 400-450 °C

Nama : Romdhoni Graha Pribadi
NRP : 01111440000040
Departemen : Fisika, Fakultas Sains-ITS
Pembimbing : Dr.rer.nat. Triwikantoro, M.Si

Abstrak

Dalam penelitian ini, paduan amorf berbasis Zirkonium dengan 3 variasi komposisi yaitu $Zr_{68}Cu_{14}Ni_{11}Al_7$, $Zr_{64.5}Cu_{17}Ni_{11}Al_{7.5}$, dan $Zr_{69.5}Cu_{12}Ni_{11}Al_{7.5}$ dilakukan karakterisasi termal untuk mengetahui perilaku oksidasi pada temperatur 400, 425, dan 450 °C dengan waktu penahanan selama 4 jam di udara. Analisis termal dilakukan dengan menggunakan Differential Scanning Calorimetry (DSC) dan Thermogravimetric Analyzer (TGA) sedangkan analisis prodak oksida yang terbentuk dilakukan dengan menggunakan X-Ray Diffractometer (XRD). Berdasarkan data kinetika oksidasi maka mengikuti hukum parabolik dengan didapatkan laju oksidasi yang meningkat dengan adanya penambahan temperatur. Prodak oksida yang terbentuk selama oksidasi isothermal pada paduan $Zr_{64.5}Cu_{17}Ni_{11}Al_{7.5}$ dan $Zr_{69.5}Cu_{12}Ni_{11}Al_{7.5}$ terdiri dari ZrO_2 (tetragonal) sebagai fasa dominan serta ZrO_2 (monoklinik) dan CuO sebagai fasa minor. Fasa intermetalik juga terbentuk pada kedua sampel yang terdiri dari Zr_2Ni dan Zr_2Cu .

Kata kunci: analisis termal, oksidasi, paduan zirkonium.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

OXIDATION BEHAVIOUR OF ZIRCONIUM BASED AMORPHOUS ALLOY AT 400-450 °C

Name : Romdhoni Graha Pribadi
NRP : 01111440000040
Department : Physics, FIA-ITS
Advisor : Dr.rer.nat. Triwikantoro, M.Si

Abstract

In this study, Zirconium-based amorphous alloys with 3 composition variations were $Zr_{68}Cu_{14}Ni_{11}Al_7$, $Zr_{64.5}Cu_{17}Ni_{11}Al_{7.5}$, $Zr_{69.5}Cu_{12}Ni_{11}Al_{7.5}$ thermal characterization was carried out to determine oxidation behavior at temperatures of 400, 425, and 450 °C with a holding time of 4 hours in air. Thermal analysis was carried out using Differential Scanning Calorimetry (DSC) and Thermogravimetric Analyzer(TGA) while the analysis of oxide products formed was carried out using X-Ray Diffractometer (XRD). Based on the oxidation kinetics data it follows parabolic law by obtaining an oxidation rate which increases with the addition of temperature. The oxides produced during isothermal oxidation in the $Zr_{64.5}Cu_{17}Ni_{11}Al_{7.5}$ and $Zr_{69.5}Cu_{12}Ni_{11}Al_{7.5}$ alloys consist of ZrO_2 (tetragonal) as the dominant phase and ZrO_2 (monoclinic) and CuO as minor phases. The intermetallic phase is also formed in both samples consisting of Zr_2Ni and Zr_2Cu .

Key word: oxidation, thermal analysis, zirconium based alloy

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

KATA PENGANTAR

Dengan mengucapkan “Alhamdulillah Robbil 'Alamin”, segala puji dan syukur penulis kepada Allah SWT atas segala karunia, rahmat, dan petunjuk-Nya sehingga berhasil menyelesaikan laporan Tugas Akhir (TA) ini dengan baik dan tanpa suatu kendala apapun. Sholawat serta salam tetap tercurahkan kepada junjungan kita Nabi Muhammad SAW yang telah menuntun kami dari kebodohan menuju cahaya kebenaran.

Tugas Akhir (TA) ini penulis susun untuk memenuhi persyaratan menyelesaikan pendidikan strata satu dan mendapatkan gelar sarjana (S1) di Departemen Fisika FIA ITS dengan judul :

“Perilaku Oksidasi Paduan Amorfus Berbasis Zirkonium Pada Temperatur 400-450 °C”

Penulis persembahkan kepada masyarakat Indonesia guna berpartisipasi untuk mengembangkan ilmu pengetahuan dalam bidang sains dan teknologi.

Penulis sadar bahwa dalam menyusun laporan Tugas Akhir (TA) ini tidak akan berjalan dengan baik dan selesai tanpa adanya bantuan dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu,

penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Keluarga besar penulis, terutama Bapak Dwidja Nugraha dan Ibu Agustini Tri Purwandari selaku orang tua penulis yang telah memberikan doa, motivasi, semangat, dan dukungan yang tiada hentinya hingga akhirnya penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini.
2. Dr.rer.nat. Triwikantoro, M.Si selaku dosen pembimbing yang telah memberi banyak bantuan, bimbingan, wawasan, pengarahan, motivasi, dan dukungan selama proses penelitian hingga akhirnya penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini.
3. Dr.rer.nat Eko Minarto, M.Si selaku dosen wali yang selalu memberikan bimbingan, arahan, dan perwalian selama masa kuliah.
4. Dr. Yono Hadi Pramono, M.Eng dan Bapak Dr.rer.nat. Eko Minarto, M.Si selaku Ketua Departemen dan Sekretaris Departemen Fisika FIA ITS yang telah memberikan kemudahan sarana kepada penulis selama masa kuliah.
5. Nandang Mufti, M.T., Ph.D selaku koordinator Laboratorium Sentral Universitas Negeri Malang yang telah mengajarkan analisa TGA dengan menggunakan *software linseis*.
6. Seluruh jajaran dosen dan staf karyawan di Departemen Fisika FIA ITS yang telah banyak memberikan ilmu, wawasan, pengalaman, dan bantuan selama masa kuliah.

7. Diah Daniar Rochim, partner yang selalu setia dalam memberikan semangat, perhatian, support, motivasi, dukungan, dan doa yang tiada hentinya, serta setiap momen maupun kenangan yang diberikan kepada penulis hingga akhirnya penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini.
8. Rekan seperjuangan satu tim penelitian dan bimbingan Tugas Akhir, Natasza Putri Riadi, Dwi Wahyu Hardiyanto, Rizqi Ahmad Fauzan, Yishar Kriwandono atas bantuan, diskusi, dan kenangan selama bersama hingga terselesaikannya Tugas Akhir ini.
9. Teman-teman seperjuangan lainnya yang sama-sama sedang berjuang untuk Tugas Akhir atas saling bantuannya selama penulis menyelesaikan Tugas Akhir.
10. Bapak Sholih, Bapak Slamet, Mas, Mbak, dan teman-teman satu laboratorium fisika material yang telah banyak membantu, mengajari, memberi pengalaman dan kenangan kepada penulis.
11. Segenap teman-teman Fisika Angkatan 2014 yang telah memberikan support terbaik bagi penulis. Terima kasih atas pelajaran berharga yang membuat kami menjadi sebuah keluarga.
12. Semua pihak yang berkontribusi dan membantu dalam penyelesaian Tugas Akhir ini yang penulis yang tidak dapat sebutkan satu persatu.

Penulis menyadari dalam penyusunan laporan ini masih terdapat kesalahan. Mohon kritik dan saran pembaca guna menyempurnakan laporan ini. Akhir kata semoga laporan Tugas Akhir ini bermanfaat bagi semua pihak dan penulis mengucapkan terima kasih yang sebanyak-banyaknya kepada semua pihak yang telah memberikan doa, dukungan, dan bantuan kepada penulis. Semoga segala bantuan, dukungan, dan doa yang diberikan kepada penulis dibalas dengan ganjaran yang sebesar-besarnya oleh Allah SWT. Aamiin Ya Robbal Alamiin.

Surabaya, Januari 2019

Penulis

Romdhoni Graha Pribadi

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
COVER PAGE	ii
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
ABSTRAK.....	v
ABSTRACT	vii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR TABEL.....	xv
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR LAMPIRAN	xix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
1.6 Sistematika Penulisan.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Paduan Zirkonium	5
2.2 Bulk Metallic Glass	8
2.3 Oksidasi	10

2.4 Temperatur Transisi Gelas	16
2.5 Difraksi Sinar X (XRD)	18
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	23
3.1 Peralatan dan Bahan.....	23
3.2 Prosedur Penelitian	23
3.3 Diagram Alir Penelitian.....	24
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN	25
4.1 Differential Scanning Calotymetry (DSC).....	25
4.2 Termogravimetric Analyzer.....	25
4.3 Analisis dan Pembahasan.....	27
4.3.1 Differential Scanning Calotymetry (DSC).....	27
4.3.2 Thermogravimetry Analyzer (TGA).....	29
4.3.3 X-Ray Diffraction (XRD)	33
BAB V KESIMPULAN.....	37
5.1 Kesimpulan	37
5.2 Saran.....	38
DAFTAR PUSTAKA	39
LAMPIRAN.....	43
BIOGRAFI PENULIS	55

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Sifat mekanis berbagai logam untuk pelapisan bahan bakar nuklir	6
Tabel 2.2 Energi bebas pembentukan oksida	10
Tabel 4.1 Data hasil pengujian DSC	25
Tabel 4.2 Data temperatur transisi gelas dan kristalisasi.....	28
Tabel 4.3 Nilai konstanta laju oksidasi	31

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Stuktur kristal α -Zr (hcp) pada bidang [11].....	7
Gambar 2.2 Hubungan orientasi β -Zr (bcc) dan α -Zr (hcp) pada bidang [11].....	7
Gambar 2.3 Hubungan antara kekuatan tarik dan Modulus Young pada paduan <i>bulk metallic glass</i>	9
Gambar 2.4 Lapisan oksida berpori	12
Gambar 2.5 Lapisan oksida tak berpori.....	13
Gambar 2.6 Penambahan berat per satuan luas terhadap waktu pada hukum kinetika untuk oksidasi logam.....	15
Gambar 2.7 Kurva aliran panas dengan suhu di daerah Tg.....	17
Gambar 2.8 Difraksi sinar-X pada bidang kristal.....	19
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian.....	24
Gambar 4.1 Kurva perubahan massa versus temperatur paduan $Zr_{64.5}Cu_{17}Ni_{11}Al_7$	26
Gambar 4.2 Kurva perubahan massa versus temperatur paduan $Zr_{69.5}Cu_{12}Ni_{11}Al_{7.5}$	26
Gambar 4.3 Kinetika oksidasi paduan $Zr_{64.5}Cu_{17}Ni_{11}Al_{7.5}$ pada 400, 425, dan 450 °C selama 4 jam di udara	30
Gambar 4.4 Kinetika oksidasi paduan $Zr_{69.5}Cu_{12}Ni_{11}Al_{7.5}$ pada 400, 425, dan 450 °C selama 4 jam di udara	31
Gambar 4.5 Pola Difraksi Sinar-X paduan $Zr_{64.5}Cu_{17}Ni_{11}Al_{7.5}$ setelah proses oksidasi dengan variasi temperatur..	33
Gambar 4.6 Pola Difraksi Sinar-X paduan $Zr_{69.5}Cu_{12}Ni_{11}Al_{7.5}$ setelah proses oksidasi dengan variasi temperatur..	34

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR LAMPIRAN

Gambar A.1 Kurva DSC paduan $Zr_{68}Cu_{14}Ni_{11}Al_7$ dengan laju pemanasan $5^{\circ}C$	41
Gambar A.2 Kurva DSC paduan $Zr_{68}Cu_{14}Ni_{11}Al_7$ dengan laju pemanasan $10^{\circ}C$	41
Gambar A.3 Kurva DSC paduan $Zr_{64.5}Cu_{17}Ni_{11}Al_{7.5}$ dengan laju pemanasan $5^{\circ}C$	42
Gambar A.4 Kurva DSC paduan $Zr_{64.5}Cu_{17}Ni_{11}Al_{7.5}$ dengan laju pemanasan $10^{\circ}C$	42
Gambar A.5 Kurva DSC paduan $Zr_{69.5}Cu_{12}Ni_{11}Al_{7.5}$ dengan laju pemanasan $5^{\circ}C$	43
Gambar A.6 Kurva DSC paduan $Zr_{69.5}Cu_{12}Ni_{11}Al_{7.5}$ dengan laju pemanasan $10^{\circ}C$	43
Gambar B.1 Kurva DTA/TG paduan $Zr_{64.5}Cu_{17}Ni_{11}Al_{7.5}$ pada temperatur $400^{\circ}C$	45
Gambar B.2 Kurva DTA/TG paduan $Zr_{64.5}Cu_{17}Ni_{11}Al_{7.5}$ pada temperatur $425^{\circ}C$	45
Gambar B.3 Kurva DTA/TG paduan $Zr_{64.5}Cu_{17}Ni_{11}Al_{7.5}$ pada temperatur $450^{\circ}C$	46
Gambar B.4 Kurva DTA/TG paduan $Zr_{69.5}Cu_{12}Ni_{11}Al_{7.5}$ pada temperatur $400^{\circ}C$	46
Gambar B.5 Kurva DTA/TG paduan $Zr_{69.5}Cu_{12}Ni_{11}Al_{7.5}$ pada temperatur $425^{\circ}C$	47
Gambar B.6 Kurva DTA/TG paduan $Zr_{69.5}Cu_{12}Ni_{11}Al_{7.5}$ pada temperatur $450^{\circ}C$	47
Gambar C.1 Grafik hubungan $\ln K_p$ versus $1/T$ pada paduan $Zr_{64.5}Cu_{17}Ni_{11}Al_{7.5}$	53
Gambar C.2 Grafik hubungan $\ln K_p$ versus $1/T$ pada paduan $Zr_{69.5}Cu_{12}Ni_{11}Al_{7.5}$	53

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Ilmu pengetahuan dan teknologi yang terus berkembang khususnya pada bidang material menuntut tersedianya material baru yang mempunyai kinerja yang tinggi. Kebutuhan akan material murni yang sangat terbatas mengharuskan dilakukannya suatu rekayasa material yang sesuai dengan penggunaannya. Penelitian terkait dengan rekayasa material sudah banyak dilakukan pada negara-negara industri seperti di Eropa, Amerika, dan Jepang. Salah satu material yang dikembangkan sampai saat ini adalah material logam dengan struktur amorf yang disebut gelas metalik (*metallic glasses*). Dalam aspek termodinamika material gelas metalik berada pada keadaan metastabil, yang berarti struktur ini dapat bertransformasi menuju ke keadaan yang lebih stabil melalui proses kristalisasi. Struktur atom pada material gelas metalik tersusun secara periodik namun tidak berjangkauan panjang. Material gelas metalik ini pertama kali ditemukan oleh P. Duwez untuk material paduan Au-Si pada tahun 1960.

Penelitian terkait material gelas metalik berbasis Zirkonium sudah banyak dilakukan. Zirkonium sebagai elemen pemadu digunakan sebagai penguat dalam pembuatan baja, porselin, alat-alat olahraga seperti stik golf dan raket, dan banyak aplikasi lainnya. Sifat mekanik yang unggul pada paduan Zirkonium seperti kekuatan yang tinggi, batas elastisitas yang besar, ketahanan korosi yang baik, serta sifat mekanik yang lain membuat material ini banyak dikaji oleh para ilmuwan. Namun pada suhu tinggi sifat-sifat unggul dari gelas metalik berbasis Zirkonium akan mengalami degradasi, salah satunya adalah oksidasi.

Menurut (Munawaroh, 2011), kinetika oksidasi paduan Zirkonium mengikuti hukum parabolik dan laju oksidasi meningkat dengan meningkatnya temperatur. Pada setiap penelitian terkait paduan Zirkonium penentuan temperatur pemanasan tergantung berapa besar laju pemanasan yang digunakan untuk mendapatkan nilai temperature transisi gelas (T_g) dan temperature kristalisasi (T_c). Meningkatnya T_g dan T_x akibat peningkatan laju pemanasan juga disertai dengan meningkatnya daerah supercooled liquid yang menunjukkan bahwa T_g dan T_x untuk bulk amorphous alloy merupakan proses kinetik (Wang, 2000). Pada penelitian Munawaroh, paduan Zirkonium dioksidasi isothermal dengan temperatur di atas temperatur kristalisasi sehingga didapatkan bahwa pada paduan gelas metalik laju oksidasi semakin meningkat ketika temperatur dinaikkan namun berlainan pada paduan nanokristalin yang mana semakin tinggi temperatur maka laju oksidanya semakin menurun.

Penelitian tersebut telah dilakukan 10 tahun lalu sehingga dilakukan untuk yang kesekian kalinya untuk mengetahui apakah sampel sudah teroksidasi oleh udara. Oleh karena itu dilakukan penelitian mengenai perilaku oksidasi paduan Zirkonium pada temperatur di sekitar temperatur kristalisasi.

1.2 Rumusan Masalah

Perumusan masalah dari penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana perilaku oksidasi paduan amorf berbasis Zirkonium pada temperatur sekitar temperatur kristalisasi?
2. Bagaimana kinetika oksidasi pada paduan amorf berbasis Zirkonium?
3. Bagaimana fasa yang terbentuk pada paduan amorf berbasis Zirkonium setelah oksidasi?

4. Bagaimana mekanisme pembentukan lapisan oksida pada permukaan sampel setelah oksidasi?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian tugas akhir ini antara lain adalah:

1. Bahan dasar yang digunakan dalam penelitian tugas akhir ini adalah pita Zirkonium dengan komposisi unsur $\text{Zr}_{68}\text{Cu}_{14}\text{Ni}_{11}\text{Al}_7$, $\text{Zr}_{64.5}\text{Cu}_{17}\text{Ni}_{11}\text{Al}_{7.5}$, $\text{Zr}_{69.5}\text{Cu}_{12}\text{Ni}_{11}\text{Al}_{7.5}$.
2. Temperatur oksidasi yang digunakan adalah 400°C , 425°C , 450°C dengan laju pemanasan $15^\circ\text{C}/\text{menit}$.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dilakukannya penelitian tugas akhir ini adalah:

1. Mengetahui perilaku oksidasi pada paduan amorf berbasis Zirkonium di sekitar temperatur kristalisasi.
2. Mengetahui kinetika oksida pada paduan amorf berbasis Zirkonium dan parameter-parameternya.
3. Mengidentifikasi fasa-fasa yang terbentuk pada paduan amorf berbasis Zirkonium setelah dioksidasi.
4. Mengetahui mekanisme pembentukan lapisan oksida pada permukaan sampel setelah oksidasi.

1.5 Manfaat penelitian

Hasil dari penelitian tugas akhir ini diharapkan dapat memberikan pemahaman tentang bagaimana perilaku oksidasi dan sifat termal dari suatu material yang dipanaskan di kondisi udara bebas.

1.6 Sistematika Penulisan

Penulisan Tugas Akhir (TA) ini terdiri dari abstrak yang berisi gambaran umum dari penelitian ini. Bab I pendahuluan yang memuat latar belakang, perumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, dan sistematika penulisan. Bab II tinjauan pustaka berisi tentang dasar-dasar teori yang digunakan sebagai acuan dari penelitian. Bab III metodologi penelitian yang berisi prosedur kerja yang digunakan dalam penelitian. Bab IV tentang hasil penelitian dan pembahasan yang didapatkan dari penelitian. Bab V tentang kesimpulan dari hasil yang didapatkan dan saran untuk penelitian lebih lanjut.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Paduan Zirkonium

Zirkonium sering digunakan dalam dunia industri tak terkecuali dalam industri nuklir sehingga dipilih sebagai bahan bakar dalam reaktor nuklir oleh Angkatan Laut Amerika Serikat pada tahun 1952. Desain reaktor yang efisien membutuhkan penggunaan bahan kelongsong penampang melintang yang penyerapan neutronnya sangat rendah dan juga memiliki sifat kimia dan mekanik yang tahan terhadap suhu tinggi. Meskipun reaktor angkatan laut pertama menggunakan Zirkonium murni, namun penggunaan paduan Zirkonium dirasa lebih efisien karena dapat tahan terhadap korosi pada suhu tinggi (Anna, 1996).

Meskipun paduan Zirkonium tidak sekuat baja namun struktur kristal yang isotropik membuat sifat mekaniknya lebih unggul dari baja. Paduan Zirkonium lebih tahan terhadap korosi suhu tinggi dan juga tahan terhadap efek iradiasi yang bersifat merusak. Zirkonium relatif lebih mahal dibandingkan *stainless steel* karena proses pemurniannya yang rumit. Zirkonium biasanya ditemukan dalam bentuk mineral zirkon (ZrSiO_4) dan *beddelyte* (ZrO_2).

Sesuai yang disebutkan di atas bahwa Zirkonium memiliki penampang serap neutron yang rendah yang disebabkan oleh pengaruh Hf. Berikut disajikan Tabel 2.1 mengenai perbandingan antara Zirkonium dengan material lainnya terkait penampang serap panas neutron.

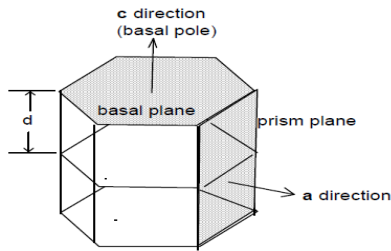
Tabel 2.1 Sifat mekanis berbagai logam untuk pelapisan bahan bakar nuklir (Cheadle, 1975)

Logam Murni	UTS (MPa)	Persilangan Neutron Makroskopik	Penyerapan Neutron Relatif
Zirkonium	900	0.01	1
Besi	1100	0.17	4
Nikel	1100	0.31	25
Titanium	1000	0.26	28
Alumunium	90	0.014	14
Magnesium	90	0.005	6
Berillium	180-350	0.001	0.25-5

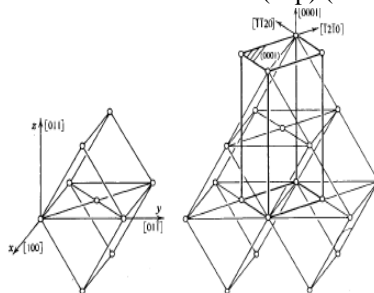
Dari tabel tersebut menunjukkan bahwa Zirkonium memiliki kombinasi kekuatan dan transparansi neutron terbaik. Namun beberapa aplikasi Zirkonium dirasa tidak cocok seperti pada badan kapal selam yang pertama kali dibuat menggunakan logam Zirkonium murni yang memiliki ketahanan korosi yang rendah. Hal itu dikarenakan oksida yang terbentuk dalam Zirkonium murni tidak bersifat melindungi dan cenderung mengelupas. Oleh karena itu dilakukan suatu penelitian terkait paduan Zirkonium yaitu dipadukan dengan material lain sehingga didapatkan sifat mekanik maupun kimia yang lebih unggul (Simpson, 1995).

Kestabilan fasa suhu rendah pada Zirkonium menunjukkan struktur heksagonal dengan parameter kisi, $a=0.323\text{nm}$ dan $c=0.515\text{nm}$ sehingga menghasilkan rasio

$c/a=1.593$ yang berarti lebih rendah dari rasio ideal 1.633. pada Gambar 2.1 menunjukkan secara skematis struktur kristal Zirkonium. Ketiga bidang sejajar tersebut mengandung atom-atom Zr di setiap sudutnya. Bidang-bidang ini disebut bidang basal, dan arah normal arah c (atau $\langle c \rangle$), juga disebut kutub basal. Bidang basal adalah bidang yang padat, yang berarti bahwa dalam bidang ini densitas areal adalah yang tertinggi. Hal penting lain dari bidang dalam struktur ini terletak di enam sisi prisma heksagonal pada Gambar 2.2, yang disebut bidang prisma. Sisi-sisi segi enam yang ditunjukkan pada Gambar 2.2 adalah tiang prisma, secara kolektif disebut arah (atau $\langle a \rangle$). Perhatikan bahwa kutub prisma tidak tegak lurus dengan bidang prisma.



Gambar 2.1. Struktur kristal α -Zr (hcp) (Tenckhoff, 1988)



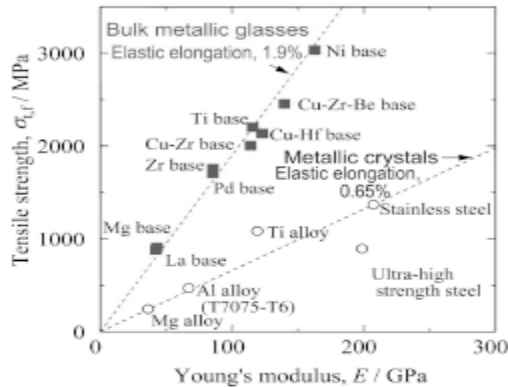
Gambar 2.2. Hubungan orientasi β -Zr (bcc) dan α -Zr (hcp) pada bidang $[11]$ (Tenckhoff, 1988)

2.2 Bulk Metallic Glass

Material logam telah digunakan beberapa tahun lalu, namun logam yang digunakan sebelum revolusi industri pada abad ke-18 telah terjadi keterbatasan pada beberapa unsur seperti emas, perak, tembaga, besi, merkuri, dan lain-lain. Selama beberapa ratus tahun setelah revolusi industri, jumlah logam yang telah digunakan oleh manusia terus meningkat secara signifikan melalui kemajuan teknologi dan didapatkan 75 jenis unsur sampai saat ini. Namun, bahan logam dalam bentuk *bulk* dengan ketebalan lebih dari beberapa millimeter telah terbatas pada struktur kristalnya. Hal ini disebabkan oleh prinsip-prinsip metalurgi seperti transformasi fase dan solidifikasi dalam logam paduan. Pada logam dan paduan memiliki sifat ikatan logam, difusi atom sering terjadi pada daerah *supercooled* pada temperatur tinggi di bawah suhu leleh sehingga terjadi nukleasi dan pertumbuhan butir sesaat pada reaksi fasa kristal (Inoue, 2001).

Pada era berkembangnya metalurgi yaitu ditemukannya transformasi fasa di daerah *supercooled* dari fasa liquid menjadi fasa kristal dapat dibentuk beberapa komponen logam yang dipadukan dengan 8 sampai 9 komponen. Pemilihan komponen paduan memungkinkan produksi *glass* pada paduan logam dalam bentuk *bulk* karena transformasi fasa dari *supercooled liquid* ke fasa kristal untuk suatu paduan dapat ditekan bahkan pada laju pendinginan yang sangat rendah (0.01K/s). Peningkatan stabilitas *supercooled liquid* terhadap kristalisasi dengan 8 sampai 9 komponen dapat dikendalikan dengan memanfaatkan fasa cair pada daerah *supercooled liquid* di dalam paduan logam sehingga bisa diarahkan pada produksi material non-equilibrium dengan

karakteristik yang tinggi dan kemampuan kerja yang unik. Paduan *bulk non-equilibrium* ini telah menarik minat dunia untuk dikembangkan sebagai aspek ilmu pengetahuan dan teknologi.



Gambar 2.3. Hubungan antara kekuatan tarik dan Modulus Young pada paduan *bulk metallic glass* (Fujita, 2005)

Pada Gambar 3 ditunjukkan hubungan kekuatan tarik dengan Modulus Young pada beberapa material *bulk metallic glass* yang mana dapat dilihat sifat mekanik yang lebih unik dari *bulk metallic glass* dibandingkan dengan logam kristal paduan. Hal-hal yang membuat *bulk metallic glass* memiliki karakteristik yang lebih unggul dibandingkan dengan logam kristal paduan yaitu kekuatan tarik dari *bulk metallic glass* lebih tinggi dibandingkan dengan logam kristal paduan pada Modulus Young yang sama. Modulus Young pada *bulk metallic glass* sekitar sepertiga lebih tinggi daripada paduan logam kristal dalam kekuatan tarik yang sama. Dan keunggulan yang lain yaitu adanya hubungan linear yang baik antara kekuatan tarik dan Modulus Young sehingga memenuhi Hukum *Hooke*. Kemiringan garis linier ini sesuai dengan batas elongasi elastis.

Selain sifat mekanisnya, energi impact yang dihasilkan lebih dari 100kJ/m² pada paduan berbasis Zirkonium. Sedangkan

ketangguhan retak yang diukur berdasarkan ASTM-E399 diperoleh bahwa untuk spesimen ukuran standar adalah $40\text{--}50\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ untuk paduan berbasis Zirkonium, $68\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ untuk paduan berbasis Cu, dan $22\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ pada paduan berbasis Ti. Hal ini menunjukkan bahwa berbagai material *bulk metallic glass* memiliki kekuatan dan keuletan yang tinggi (Yokoyama, 2004).

2.3 Oksidasi

Kecenderungan metal untuk bereaksi dengan oksigen didorong oleh penurunan energi bebas yang mengikuti pembentukan oksidasinya. Perubahan energi bebas dalam pembentukan oksida untuk beberapa unsur terlihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Energi bebas pembentukan oksida (Sudaryanto, 2012)

Kalsium	-138.2		Hidrogen	-58.3
Magnesium	-130.8		Besi	-55.5
Alumunium	-120.7		Kobalt	-47.9
Titanium	-101.2		Nikel	-46.1
Natrium	-83.0		Tembaga	-31.5
Chrom	-81.6		Perak	+0.6
Zink	-71.3		Emas	+10.5

Kebanyakan unsur yang tercantum dalam Tabel 2.2 memiliki energi bebas pembentukan oksida bernilai negatif, yang berarti bahwa unsur ini dengan oksigen mudah bereaksi membentuk oksida.

Perak dan emas dalam Tabel 2.2 memiliki energi bebas pembentukan oksida positif. Unsur ini tidak membentuk oksida. Namun material ini jika bersentuhan dengan udara akan terlapisi oleh oksigen; atom-atom oksigen terikat ke permukaan material ini dengan ikatan lemah *van de Waals*; mekanisme pelapisan ini disebut adsorpsi.

Sesungguhnya tidaklah mudah memperoleh permukaan padatan yang benar-benar bersih. Upaya pembersihan permukaan bisa dilakukan dalam ruang vakum sangat tinggi (10^{-10} mm.Hg); namun vakum tinggi saja tidaklah cukup; proses pembersihan harus disertai pemanasan atau bombardemen ion agar oksida terbebas dari permukaan. Namun permukaan yang sudah bersih ini akan segera terlapisi molekul gas jika tekanan dalam ruang vakum menurun. Jika gas yang berada dalam ruang vakum adalah gas mulia, pelapisan permukaan terjadi secara adsorpsi. Sementara itu atom-atom di permukaan material pada umumnya membentuk lapisan senyawa apabila bersentuhan dengan oksigen. Senyawa dengan oksigen ini benar-benar merupakan hasil proses reaksi kimia dengan ketebalan satu atau dua molekul. Pelapisan ini mungkin juga berupa lapisan oksigen satu atom yang disebut kemisorpsi.

Lapisan oksida di permukaan metal bisa berpori (dalam kasus natrium, kalium, magnesium) bisa pula rapat tidak berpori (dalam kasus besi, tembaga, nikel). Muncul atau tidak munculnya pori pada lapisan oksida berkorelasi dengan perbandingan volume oksida yang terbentuk dengan volume metal yang teroksidasi. Perbandingan ini dikenal sebagai *Pilling-Bedworth Ratio*:

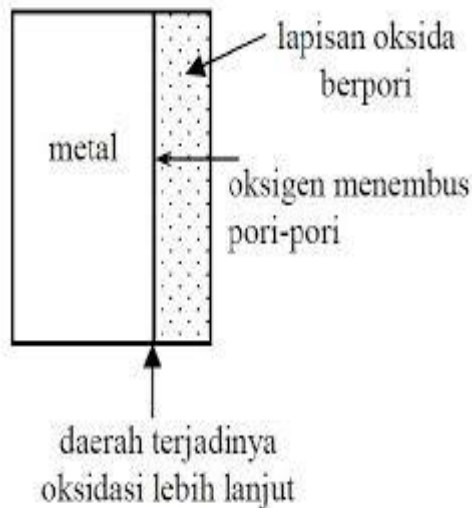
$$\frac{\text{volume oksida}}{\text{volume metal}} = \frac{M}{D} / \frac{am}{d} = \frac{Md}{amD} \quad (2.1)$$

M adalah berat molekul oksida (dengan rumus M_aO_b), D adalah kerapatan oksida, a adalah jumlah atom metal per molekul oksida, m adalah berat atom metal, dan d adalah kerapatan metal.

Jika rasio volume oksida-metal kurang dari satu, lapisan oksida yang terbentuk akan berpori. Jika rasio volume oksida-metal saling mendekati satu atau sedikit lebih dari satu maka lapisan oksida yang terbentuk adalah rapat, tidak berpori. Jika rasio ini jauh lebih besar dari satu, lapisan oksida akan retak-retak.

Pada umumnya lapisan oksida yang terjadi di permukaan metal cenderung menebal. Berikut ini beberapa mekanisme yang mungkin terjadi.

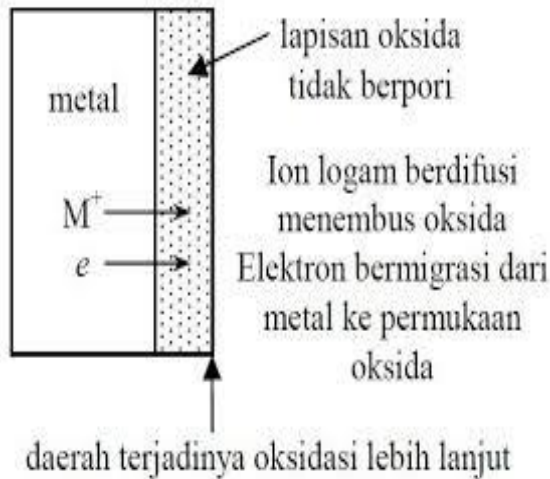
- a) Jika lapisan oksida yang pertama-tama terbentuk adalah berpori, maka molekul oksigen bisa masuk melalui pori-pori tersebut dan kemudian bereaksi dengan metal di perbatasan metal oksida. Lapisan oksida bertambah tebal. Situasi ini terjadi jika rasio volume oksida-metal kurang dari satu. Lapisan oksida ini bersifat non-protetif, tidak memberikan perlindungan pada metal yang dilapisinya terhadap proses oksidasi lebih lanjut. Peristiwa ini dapat digambarkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Lapisan oksida berpori (Sudaryanto, 2010)

- b) Jika lapisan oksida tidak berpori, ion metal bisa berdifusi menembus lapisan oksida menuju bidang batas oksida-udara, dan di perbatasan oksida-udara ini metal bereaksi dengan

oksigen dan menambah tebal lapisan oksida yang telah ada. Proses oksidasi berlanjut di permukaan. Dalam hal ini elektron bergerak dengan arah yang sama agar pertukaran elektron dalam reaksi ini bisa terjadi. Peristiwa ini dapat digambarkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Lapisan oksida tak berpori (Sudaryanto, 2010)

Terjadinya difusi ion, baik ion metal maupun ion oksigen memerlukan koefisien difusi yang cukup tinggi. Sementara itu gerakan elektron menembus lapisan oksida memerlukan konduktivitas listrik oksida yang cukup tinggi pula. Oleh karena itu jika lapisan oksida memiliki konduktivitas rendah, laju penambahan ketebalan lapisan juga rendah karena terlalu sedikitnya elektron yang bermigrasi dari metal menuju perbatasan oksida-udara yang diperlukan untuk pertukaran elektron dalam reaksi.

Jika koefisien difusi rendah, pergerakan ion metal ke arah perbatasan oksida-udara akan lebih lambat dari migrasi elektron.

Penumpukan ion metal akan terjadi di bagian dalam lapisan oksida dan penumpukan ion ini akan menghalangi difusi ion metal lebih lanjut. Koefisien difusi yang rendah dan konduktivitas listrik yang rendah dapat membuat lapisan oksida bersifat protektif, menghalangi proses oksidasi lebih lanjut.

Apabila lapisan oksida yang mula-mula terbentuk berpori, oksigen dapat tembus dan terjadi pada antar muka oksida-logam. Namun umumnya lapisan tipis tidak berpori dan oksidasi selanjutnya mencakup difusi melalui lapisan oksida. Apabila terjadi oksidasi di permukaan oksida-oksigen maka ion logam dan elektron harus berdifusi dalam logam yang berada di bawahnya. Apabila reaksi oksidasi terjadi di antarmuka logam-oksida, ion oksigen harus berdifusi melalui oksida dan elektron berpindah dengan arah berlawanan untuk menuntaskan reaksi, logam yang bereaksi dengan oksigen atau gas lainnya pada suhu tinggi akan mengalami reaksi kimia. Pada tingkat oksidasi, hukum kinetika parabola, linier, dan logaritma menggambarkan tingkat oksidasi untuk logam umum dan paduan. Dalam hal ini oksigen bereaksi untuk membentuk oksida pada permukaan logam, diukur dengan penambahan berat. Penambahan berat pada setiap waktu (t) selama oksidasi sebanding dengan ketebalan oksida (x). logam tertentu, seperti baja, harus dilapisi untuk pencegahan korosi, karena memiliki tingkat oksidasi yang tinggi.

Pada tingkat hukum parabola, laju oksidasi temperatur tinggi pada logam sering mengikuti hukum laju parabolik, yang memerlukan ketebalan (x), proporsional ke waktu (t) yaitu,

$$x^2 = K_p t \quad (2.2)$$

Di mana K_p dikenal sebagai konstanta laju parabolik, dan x adalah ($\Delta W/A$). Dan penebalan lapisan bertambah secara parabolik sesuai hubungan

$$\Delta W^2 = K_p t \quad (2.3)$$

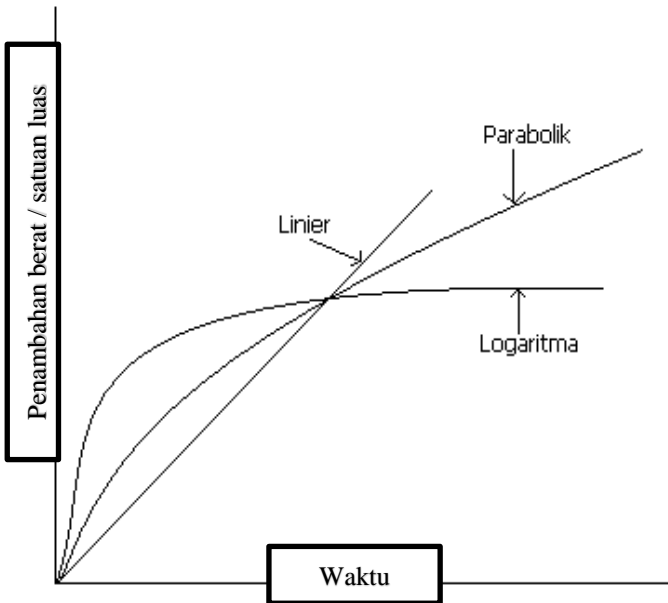
$$\Delta W = W_1 - W_0 \quad (2.4)$$

Di mana:

K_p = konstanta laju parabolik

W_0 = berat awal spesimen / satuan luas

W_1 = berat akhir spesimen satuan luas



Gambar 2.6 Penambahan berat terhadap waktu pada hukum kinetika untuk oksidasi logam (Evans, et.al, 1960)

Proses untuk mencapai keadaan transisi kompleks membutuhkan energi yang disuplai dari luar sistem. Energi inilah yang disebut dengan energi aktivasi. Pada reaksi endoterm ataupun

eksoterm, keduanya memiliki energi aktivasi yang positif, karena keadaan keadaan transisi kompleks memiliki tingkat energi yang lebih tinggi dari reaktan (Castellan, 1982). Pada dasarnya diketahui bahwa laju reaksi sangat dipengaruhi oleh suhu. Dalam model Arrhenius suhu merupakan faktor yang sangat berpengaruh terhadap penurunan mutu produk pangan. Semakin tinggi suhu, maka akan semakin tinggi pula laju reaksi, dengan kata lain semakin tinggi T maka akan semakin tinggi pula nilai K_p . Hubungan ini berdasarkan teori aktivasi, bahwa suatu reaksi perubahan akan mulai berlangsung jika diberikan sejumlah energi minimum yang disebut sebagai energi aktivasi (E_a), yang dinyatakan dalam persamaan:

$$\ln k = \ln k_0 - \frac{E_a}{RT} \quad (2.5)$$

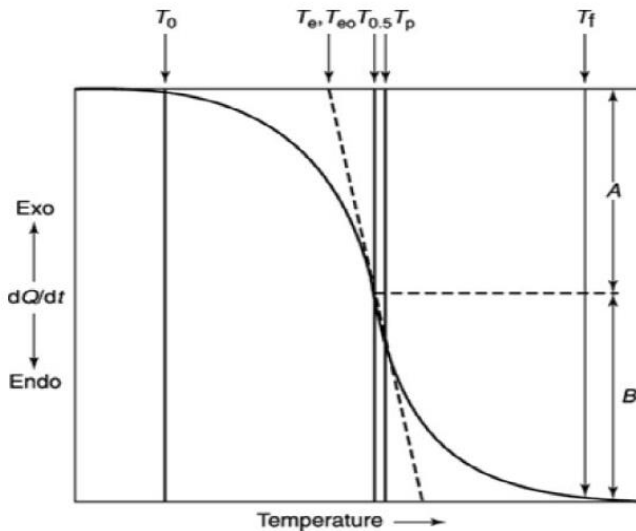
di mana E_a adalah energi aktivasi yang nilainya dianggap konstan (tetap) pada kisaran suhu tertentu, R adalah konstanta gas (8.314 J/mol K), T adalah suhu yang dinyatakan dalam Kelvin (K) (Martono et.al, 2014).

Pengaruh suhu terhadap kecepatan reaksi kimia pertama kali diungkapkan oleh Vant Hoff pada 1984. Kemudian diperluas oleh Hood dan Arrhenius pada 1885 serta 1889. Konstanta laju penurunan mutu pada suhu yang bervariasi bisa dihitung berdasarkan perhitungan matematis yaitu dengan metode kinetika reaksi menurut teori Arrhenius. Pada dasarnya harga logaritmik dari konstanta kecepatan reaksi adalah sebanding dengan $1/T$. Dengan kata lain, kecepatan reaksi (k) sangat terpengaruh oleh faktor suhu (Cahyadi, 2006).

2.4 Temperatur Transisi Glass

Temperatur transisi gelas merupakan karakteristik penting dari bahan amorfus dan semikristalin, T_g adalah properti yang

sangat penting dari banyak polimer umum. Pada suhu di bawah T_g , polimer amorfus dan semikristalin cenderung keras dan rapuh karena rantai polimer terkunci dalam posisi yang tidak beraturan dan melingkar. Di atas temperatur T_g , polimer melepaskan sifat-sifat gelasnya yang kaku dan cenderung menjadi lebih elastis. Umumnya titik T_g bergantung pada pengolahan material, begitu pula karakteristik alami material seperti struktur, ikatan, dan berat molekul. Karena dibutuhkan energi untuk melepaskan ikatan ini, transisi gelas muncul pada kurva DSC sebagai proses endotermik. Pada termogram DSC, T_g dapat ditemukan dengan penurunan permanen pada aliran panas awal, dan T_g biasanya diambil sebagai titik belok pada kurva (Hutapea, 2008).



Gambar 2.7 Kurva aliran panas dengan suhu di daerah T_g (Mark, 2005)

Untuk penentuan nilai T_g , tentukan suhu “onset” terlebih dahulu. Suhu onset dapat dicari dengan menentukan di mana titik yang pertama terjadi penyimpangan dari garis dasar pada sisi suhu

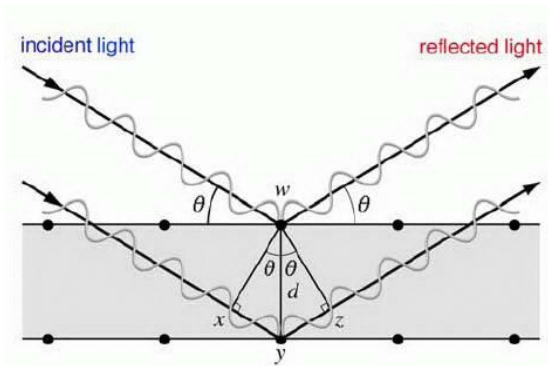
rendah diamati. Sangat subjektif dan seringkali sulit ditentukan karena kemiringan garis dasar itu tidak bisa diulang T_e dan T_o (onset ekstrapolasi, juga disebut suhu fiktif) adalah suhu di persimpangan garis dasar ekstrapolasi dan garis singgung yang diambil pada titik kemiringan maksimum. Hal ini umumnya dapat diulang dan merupakan nilai yang paling banyak dikutip dalam publikasi awal tentang metode termal. $T_{0.5}$, endoterm setengah tinggi atau disebut setengah perubahan menjadi gelas adalah suhu yang disukai dalam beberapa tahun terakhir untuk menentukan T_g . Fitur autoanalisis yang tersedia dengan semua peralatan analisis termal modern membuat penentuan ini mudah dan dapat diulangi. Ini memiliki kemampuan pengulangan yang lebih baik daripada metode ekstrapolasi dan menempatkan suhu di mana transisi termal hampir mencapai titik belok. ASTM E1356 dan ASTM D3418 merekomendasikan baik T_e atau $T_{0.5}$ untuk menentukan T_g (Mark, 2005).

2.5 Difraksi Sinar-X (XRD)

Difraksi sinar-X merupakan metode untuk mengetahui jenis susunan atom-atom dalam suatu kristal. Berkas sinar-X yang memiliki panjang gelombang beberapa angstrom akan dihamburkan jika dikenakan pada sebuah kristal zat padat. Dalam beberapa arah, gelombang-gelombang tersebut berada dalam satu fasa dan saling memperkuat, atau berinterferensi secara konstruktif, sedangkan pada arah yang lain gelombang hamburan ini tidak sefasa dan saling meniadakan, atau berinterferensi secara destruktif. Pola puncak difraksi sinar-X dapat digunakan untuk mengetahui struktur material dengan mengukur besarnya intensitas yang dipancarkan. Perubahan lebar puncak atau posisi dapat digunakan menentukan ukuran kristal, kemurnian dan susunan kristal. Sinar-X merupakan radiasi gelombang elektromagnetik transversal

dengan daerah panjang gelombang 0,1–1000 Å yang terdiri dari partikel tidak bermuatan. Pada saat berkas sinar-X diradiasikan pada sebuah atom, maka berkas tersebut akan diserap atau dihamburkan oleh atom, peristiwa inilah yang pada akhirnya dapat menginformasikan fasa-fasa yang ada pada sebuah material. Difraksi sinar-X merupakan metode karakterisasi bahan dengan preparasi sampel yang relatif mudah dan proses pengujian yang cepat (Latif, 2014).

Difraksi sinar-X oleh sebuah material terjadi akibat dua fenomena: (1) hamburan oleh tiap atom dan (2) interferensi gelombang-gelombang yang dihamburkan oleh atom-atom tersebut (Pratapa, 2004). Hukum Bragg dapat diilustrasikan pada Gambar 2.8 yang menyatakan bahwa jika terdapat sebuah kristal ditembakkan oleh 2 sinar yang sudut datangnya sama dengan sudut pantulnya yaitu θ , sinar datang yang paling atas akan menumbuk titik w dan kemudian sinar dipantulkan. Begitu juga dengan sinar datang yang paling bawah akan menumbuk titik y, tetapi dengan tambahan jarak $xy+yz$ (karena jarak tempuh sinar atas = jarak tempuh sinar bawah, jarak yang sama ditunjukkan oleh batas $wx=wz$). Jarak tambahan ini haruslah sama dengan integral (penjumlahan) n dikalikan λ agar kedua fasa sinar menjadi tetap sama. Efek kumulatif dari hamburan yang berasal dari pusat kristal-pusat kristal yang berjarak teratur adalah terjadinya difraksi sinar (Callister, 2007). Ilustrasi difraksi sinar-X pada bidang kristal dapat dilihat pada Gambar 2.8 berikut.



Gambar 2.8 Difraksi sinar-X pada bidang kristal (Afiati, 2009)

Persamaan (2.6) merepresentasikan model matematis syarat terjadinya difraksi diberikan oleh hukum Bragg.

$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda \quad (2.6)$$

dengan d_{hkl} adalah jarak antar-bidang (*interplanar spacing*) untuk sebuah kristal, θ_B adalah sudut Bragg dan λ adalah panjang gelombang radiasi. Hukum bragg dapat dikatakan sebagai representasi non-vektorial dua dimensi sebagai syarat terjadinya difraksi.

Prinsip kerja difraktometer adalah sampel diletakkan pada sebuah piringan yang digerakkan memutar sesuai prinsip geonimeter dan ditumbuk oleh berkas sinar-X. Berkas yang dipantulkan akan ditangkap oleh sebuah detektor yang mengubah berkas terdeteksi menjadi pulsa listrik. Selama sampel bergerak, sudut diantara berkas sinar-x dan sampel berubah semakin besar. Bidang kristal yang memenuhi syarat difraksi Bragg akan memberikan pantulan dan interferensi konstruktif dengan sudut hamburan 2θ . Sinar-X yang menjangkau detektor akan terekam sebagai deretan puncak pada bagian atas latar belakang (*background*). Pola grafik hasil pengukuran dengan difraktometer

sinar-X pada dasarnya memuat data yang menghubungkan intensitas sinar-X (I) yang diterima detektor sebagai fungsi sudut pantul/difraksi (2θ) (Afiati, 2009).

Setiap senyawa atau unsur yang berstruktur kristal tertentu akan memiliki pola difraksi tertentu juga, sehingga struktur suatu zat dapat diperkirakan berdasarkan pola difraksinya. Pada tabel 2.1 menjelaskan tentang informasi yang dapat diperoleh dari uji XRD. Terdapat tiga karakter grafik pada hasil uji XRD, yaitu posisi puncak, tinggi puncak, lebar dan bentuk puncak. Pola difraksi yang diperoleh memuat beberapa informasi di antaranya (Pratapa, 2004):

- Jumlah keadaan relatif dan prosen fasa kristalin dalam sampel.
- Ukuran dan bentuk unit sel kristalin dari berbagai fasa. Simetri dalam susunan atomik dalam berbagai fasa (*space group*).
- Penempatan atom terutama dalam unit sel (termasuk substitusi parsial dalam larutan padat).
- Ketidaksempurnaan kristal seperti ukuran partikel dan cacat kisi (dislokasi dan kesalahan umum).

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

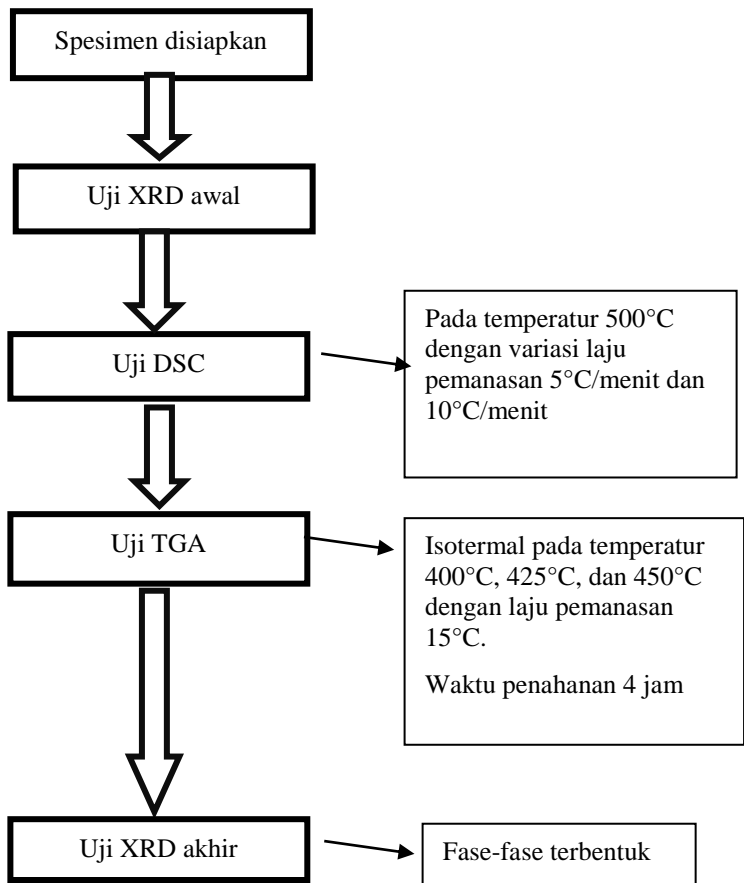
3.1 Peralatan dan Bahan

Penelitian yang akan dilakukan menggunakan peralatan dan bahan sebagai berikut, spesimen berbasis Zirkonium berbentuk pita dengan tebal 30 μ m, lebar 2mm, dan panjang 1cm dengan komposisi kandungan terdapat 3 variasi yaitu $\text{Zr}_{68}\text{Cu}_{14}\text{Ni}_{11}\text{Al}_7$, $\text{Zr}_{64.5}\text{Cu}_{17}\text{Ni}_{11}\text{Al}_{7.5}$, $\text{Zr}_{69.5}\text{Cu}_{12}\text{Ni}_{11}\text{Al}_{7.5}$. Ketiga sampel terlebih dahulu digosok dengan kertas amplas berukuran 1000 mesh untuk menghilangkan pengotor yang menempel pada spesimen. Bahan lain yang digunakan yaitu etanol 96% untuk mensterikan atau membersihkan spesimen. Digunakan pula penjapit spesimen untuk mengangkat atau meletakkan spesimen ke dalam wadah agar spesimen tidak terkontaminasi.

3.2 Prosedur Penelitian

Ketiga spesimen yang telah digosok dan dibersihkan dipersiapkan untuk dilakukan pengujian. Uji yang dilakukan yaitu uji XRD, DSC, dan TGA. Pada uji XRD dilakukan pada awal penelitian dan akhir penelitian guna mengetahui perubahan fasa yang terjadi. Digunakan sudut panjang pada uji XRD. Untuk mengetahui temperatur glass dan temperatur kristalisasi maka dilakukan uji DSC dengan variasi laju pemanasan pada masing-masing spesimen yaitu 5°C/min dan 10°C/min pada suhu 500°C. Selanjutnya dilakukan uji TGA untuk mengetahui perilaku oksidasi pada spesimen dengan variasi suhu yaitu 400°C, 425°C, dan 450°C dengan laju pemanasan 15°C. Pada uji TGA ini dilakukan secara isothermal dengan waktu penahanan selama 4 jam. Setelah itu dilakukan uji XRD kembali untuk mengetahui perubahan fasa yang terjadi setelah teroksidasi.

3.3 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

BAB IV

ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

Data hasil dari penelitian Tugas Akhir ini terdiri dari data DSC, TGA, dan XRD. Data selengkapnya dapat ditulis seperti pada tabel di bawah ini.

4.1 Differential Scanning Calorimetry (DSC)

Hasil pengujian DSC dari ketiga sampel disajikan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Data hasil pengujian DSC

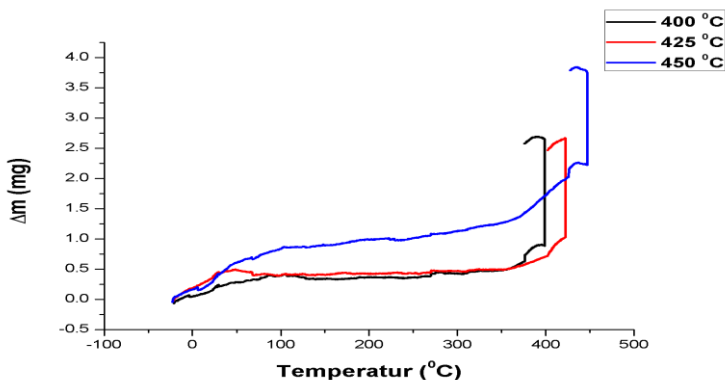
Sampel	Laju Pemansan (°C/menit)	T(onset) (°C)	T _{x1} (°C)	T _{x2} (°C)	T(endset) (°C)
Zr ₆₈ Cu ₁₄ Ni ₁₁ Al ₇	5	393.07	419.11		425.74
	10	404.42	427.53		435.04
Zr _{64,5} Cu ₁₇ Ni ₁₁ Al _{7,5}	5	402.24	416.87	446.21	452.32
	10	418.03	426.20	455.49	461.47
Zr _{69,5} Cu ₁₂ Ni ₁₁ Al _{7,5}	5	422.96	433.60		437.63
	10	436.92	442.26		446.51

Dari termogram hasil *Differential Scanning Calorimetry* (DSC) pada lampiran maka nilai Tx pada Tabel 4.1 merupakan nilai dari daerah transisi kristalisasi. Nilai temperatur transisi gelas (Tg) sulit untuk diketahui karena pada termogram hasil DSC tidak nampak adanya fasa perubahan transisi dari amorf menuju kristal. Hal ini diduga disebabkan karena keadaan sampel yang sudah teroksidasi oleh udara luar.

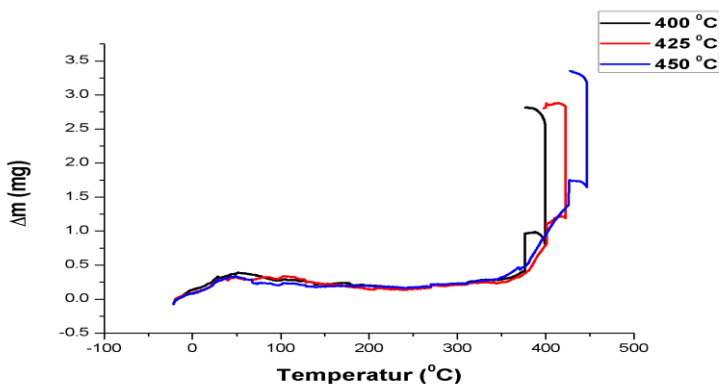
4.2 Thermogravimetry Analyzer (TGA)

Hasil pengujian TGA dari beberapa sampel disajikan pada Gambar 4.1 dan 4.2. Pada pengujian TGA ini digunakan 2 sampel

yaitu $\text{Zr}_{64.5}\text{Cu}_{17}\text{Ni}_{11}\text{Al}_{7.5}$ dan $\text{Zr}_{69.5}\text{Cu}_{12}\text{Ni}_{11}\text{Al}_{7.5}$. Berikut hasil data TGA pada kedua sampel.



Gambar 4.1 Kurva perubahan massa versus temperatur paduan $\text{Zr}_{64.5}\text{Cu}_{17}\text{Ni}_{11}\text{Al}_{7.5}$



Gambar 4.2 Kurva perubahan massa versus temperatur paduan $\text{Zr}_{69.5}\text{Cu}_{12}\text{Ni}_{11}\text{Al}_{7.5}$

Dari termogram hasil kurva TGA pada lampiran maka dilakukan analisa lebih lanjut menggunakan software *linseis* sehingga

didapatkan kurva TG seperti pada Gambar 4.1 dan 4.2. Berdasarkan Gambar 4.1 dan 4.2 dapat dilihat terjadi perubahan massa, semakin bertambah temperatur pemanasan maka terjadi kenaikan massa.

4.3 Analisis dan Pembahasan

4.3.1 Differential Scanning Calorimetry (DSC)

Hasil karakterisasi termal dengan menggunakan DSC (*Differential Scanning Calorimetry*) menunjukkan bahwa nilai temperatur transisi kristalisasi tergantung pada laju pemanasan dan komposisi paduan sampel. Temperatur transisi kristalisasi yang paling tinggi terdapat pada sampel $\text{Zr}_{69.5}\text{Cu}_{12}\text{Ni}_{11}\text{Al}_{7.5}$ yaitu 442.26°C , sedangkan temperatur transisi kristalisasi paling rendah terdapat pada sampel $\text{Zr}_{64.5}\text{Cu}_{17}\text{Ni}_{11}\text{Al}_{7.5}$ yaitu 416.87°C dengan laju pemanasan $5^{\circ}\text{C}/\text{menit}$. Begitu pula pada laju pemanasan $10^{\circ}\text{C}/\text{menit}$ menunjukkan bahwa temperatur transisi kristalisasi paling tinggi yaitu pada sampel $\text{Zr}_{69.5}\text{Cu}_{12}\text{Ni}_{11}\text{Al}_{7.5}$ dan yang paling rendah pada sampel $\text{Zr}_{64.5}\text{Cu}_{17}\text{Ni}_{11}\text{Al}_{7.5}$ (dapat dilihat pada Tabel 4.1). Hal ini menunjukkan bahwa komposisi unsur Zirkonium mempengaruhi temperatur transisi kristalisasi pada suatu paduan amorf berbasis Zirkonium. Di samping itu adanya unsur Cu juga mempengaruhi pembentukan dari fasa amorf menuju fasa kristal. Penambahan unsur pepadu tembaga mengakibatkan terjadinya peningkatan laju pengintian karena atom Cu memiliki kemampuan berdifusi untuk membentuk struktur kristal yang lebih stabil (Triwikantoro, 2004).

Adanya puncak puncak pada temperatur kristalisasi menandakan bahwa pada temperatur kristalisasi terjadi proses kristalisasi pada suatu paduan. Hal ini dapat dilihat pada analisa XRD di mana fasa awal dari suatu paduan Zirkonium yaitu fasa amorf yang jika dipanaskan hingga temperatur tertentu terbentuk

fasa-fasa intermetalik ataupun kristal oksida. Pada sampel $\text{Zr}_{64.5}\text{Cu}_{17}\text{Ni}_{11}\text{Al}_{7.5}$ terdapat 2 puncak yang menandakan adanya proses kristalisasi terjadi 2 kali. Kristalisasi $\text{T}_{\text{x}1}$ kemungkinan merupakan kristalisasi yang terjadi akibat pembentukan fasa intermetalik dan juga dimungkinkan terjadi akibat adanya oksida. Sedangkan puncak yang kedua atau $\text{T}_{\text{x}2}$ disebabkan oleh adanya kristalisasi intermetalik, tetapi tidak menutup kemungkinan merupakan pemantapan kristal oksida.

Pengaruh komponen pepadu Zirkonium terhadap proses kristalisasi yaitu semakin besar komponen pepadunya maka semakin lambat proses kristalisasinya. Hal ini berkaitan dengan daerah *supercooled liquid* ($\Delta\text{T}_{\text{x}}$). Nilai $\Delta\text{T}_{\text{x}}$ menurun seiring dengan penambahan komposisi Zirkonium (Dwinda, 2006). Daerah *supercooled liquid* berhubungan dengan proses pengintian. Semakin besar harga *supercooled* maka kecepatan nukleasinya semakin cepat sehingga akan terbentuk banyak inti dengan ukuran kristal yang kecil. Hasil pengamatan Dwinanda menunjukkan bahwa dengan bertambahnya komponen pepadu Zirkonium akan menaikkan harga temperatur kristalisasi. Untuk melakukan perbandingan dengan hasil yang ada dapat ditunjukkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Data temperatur transisi gelas dan kristalisasi (Dwinda, 2006)

Sampel	T_{g} ($^{\circ}\text{C}$)	T_{x} ($^{\circ}\text{C}$)
$\text{Zr}_{65}\text{Cu}_{17.5}\text{Ni}_{10}\text{Al}_{7.5}$	378.5	428
$\text{Zr}_{68}\text{Cu}_{14}\text{Ni}_{11}\text{Al}_7$	368	415.5
$\text{Zr}_{69.5}\text{Cu}_{12}\text{Ni}_{11}\text{Al}_{7.5}$	392	431

Dengan membandingkan hasil pada tabel 4.1 yang didapatkan dalam penelitian ini dengan penelitian oleh Dwinanda memiliki perbedaan. Perbandingan pada komponen pepadu yang

sama yaitu $\text{Zr}_{68}\text{Cu}_{14}\text{Ni}_{11}\text{Al}_7$ dan $\text{Zr}_{69.5}\text{Cu}_{12}\text{Ni}_{11}\text{Al}_{7.5}$ memiliki nilai temperatur transisi kristalisasi yang berbeda. Terdapat terjadi pergeseran temperatur transisi kristalisasi menjadi lebih besar. Hal ini disebabkan karena riwayat sampel yang sudah tersimpan selama 10 tahun sehingga keadaan sampel sudah mengalami oksidasi dengan udara luar. Semakin banyak oksigen yang terkandung di dalam sampel maka akan memperbesar fraksi volume kristal yang terbentuk. Kandungan oksigen dalam amorf yang kurang dari 0.5% akan berpengaruh pada perubahan struktur amorf ke quasikristal (Gebert, 1998).

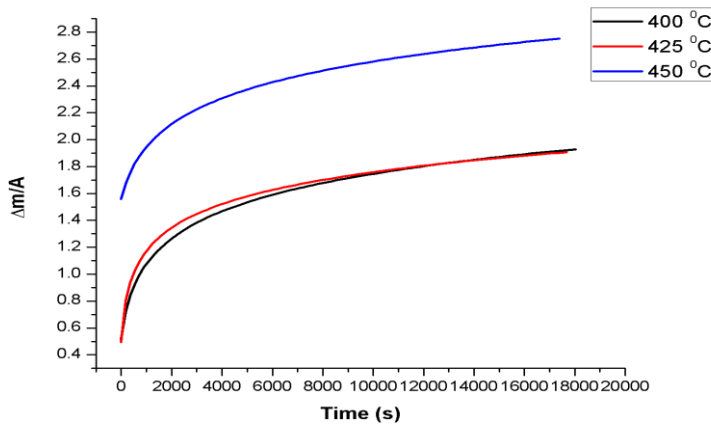
Laju pemanasan juga mempengaruhi harga dari temperatur kristalisasi. Terlihat pada Tabel 4.1 terjadi pergeseran dari nilai temperatur kristalisasi. Hal ini juga berkaitan dengan daerah *supercooled liquid* yang terbentuk. Meningkatnya T_g dan T_x akibat peningkatan laju pemanasan juga disertai dengan meningkatnya daerah *supercooled liquid* (Triwikantoro, 2007). Semakin besar laju pemanasan maka proses nukleasi semakin lambat karena atom berdifusi hingga keadaan stabilnya.

4.3.2 Thermal Gravimetry Analysis (TGA)

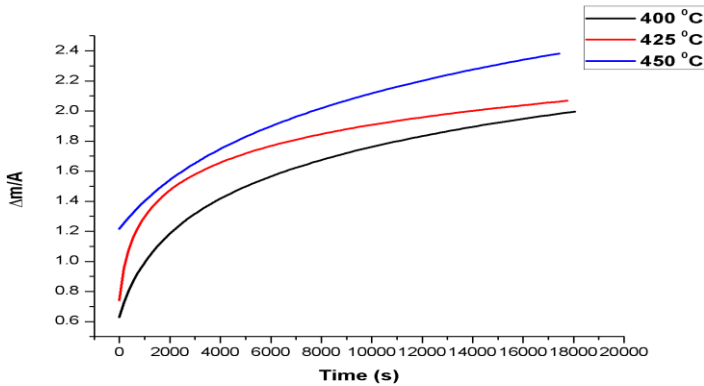
Gambar 4.1 dan 4.2 menunjukkan perubahan berat sebagai fungsi waktu pada temperatur 400°C, 425°C, dan 450°C selama 4 jam di udara. Berdasarkan gambar tersebut terjadi kenaikan massa ketika dilakukan penahanan temperatur. Hal ini terjadi karena paduan Zirkonium memiliki nilai *Pilling-Bedworth Ratio* sebesar 1.56 sehingga Zirkonium cenderung pasif di udara kering dengan menciptakan lapisan oksida. Pembentukan lapisan oksida ini dikarenakan adanya peningkatan temperatur yang membuat energi termal yang diterima oleh paduan juga bertambah sehingga energi ini digunakan untuk bereaksi dengan oksigen. Lapisan oksida awal yang terbentuk berupa lapisan kompak (tak berpori) sehingga ion-

ion logam dapat berdifusi menembus lapisan oksida menuju bidang batas oksida-udara, dan di perbatasan oksida-udara inilah logam-logam bereaksi dengan oksigen dan menambah tebal lapisan oksida yang telah ada. Lapisan oksida yang kompak dapat dengan sempurna membentuk lapisan yang padat (Kofstad, 1972).

Berdasarkan Gambar 4.1 dan 4.2 maka untuk mengetahui kinetika oksidasinya dilakukan perhitungan dengan mengplotkan grafik hubungan perubahan massa per satuan luas ($\Delta m/A$) dengan waktu. Plot grafik tersebut diambil pada saat temperatur penahanan. Berikut kurva kinetika oksidasi pada sampel $Zr_{64.5}Cu_{17}Ni_{11}Al_{7.5}$ dan $Zr_{69.5}Cu_{12}Ni_{11}Al_{7.5}$.



Gambar 4.3 Kinetika oksidasi paduan $Zr_{64.5}Cu_{17}Ni_{11}Al_{7.5}$ pada 400, 425, dan 450 °C selama 4 jam di udara



Gambar 4.4 Kinetika oksidasi paduan $Zr_{69.5}Cu_{12}Ni_{11}Al_{7.5}$ pada 400, 425, dan 450 °C selama 4 jam di udara

Pada Gambar 4.3 dan 4.4 terlihat bahwa kinetika oksidasi pada paduan $Zr_{64.5}Cu_{17}Ni_{11}Al_{7.5}$ dan $Zr_{69.5}Cu_{12}Ni_{11}Al_{7.5}$ mengikuti fungsi parabolik. Dalam penelitian Triwikantoro, kinetika oksidasi mengikuti fungsi parabolik begitupula dengan penelitian yang dilakukan oleh Munawaroh. Terjadi penambahan massa diiringi dengan peningkatan temperatur. Hal ini dikarenakan pada temperatur tinggi terbentuk lapisan oksida yang bertambah tebal.

Untuk mengetahui nilai konstanta laju oksidasi (K_p) maka dilakukan perhitungan sesuai persamaan (2.2) sehingga didapatkan data sebagai berikut:

Tabel 4.3 Nilai konstanta laju oksidasi

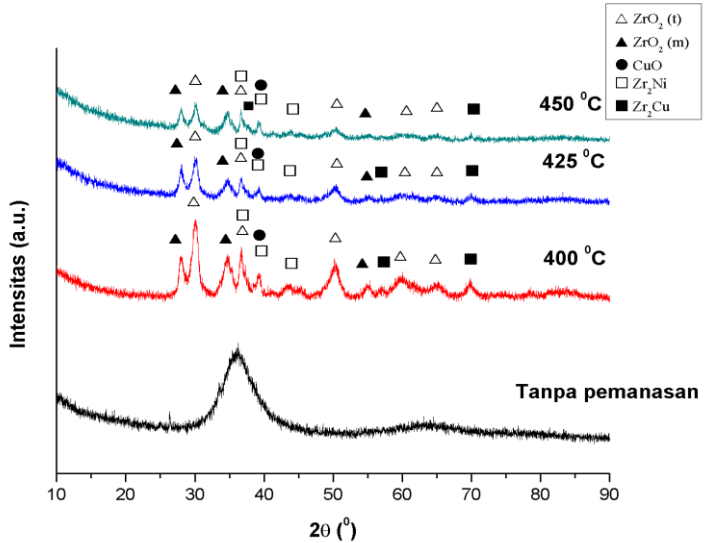
Paduan	K_p ($mg^2 cm^{-4} s^{-1}$)		
	400 °C	425 °C	450 °C
$Zr_{64.5}Cu_{17}Ni_{11}Al_{7.5}$	1.34×10^{-4}	1.48×10^{-4}	2.27×10^{-4}
$Zr_{69.5}Cu_{12}Ni_{11}Al_{7.5}$	1.52×10^{-4}	1.73×10^{-4}	2.36×10^{-4}

Berdasarkan hasil perhitungan pada Tabel 4.3 maka nilai konstanta laju oksidasi semakin meningkat seiring dengan meningkatnya temperatur. Hal ini karena dengan meningkatnya temperatur maka energi termal yang diterima oleh paduan Zirkonium juga bertambah dan energi ini digunakan oleh paduan untuk bereaksi dengan oksigen atau udara luar. Pada temperatur tinggi, atmosfer bersifat oksidatif, atmosfer berpotensi untuk mengoksidasi logam (Hauffe, 1952).

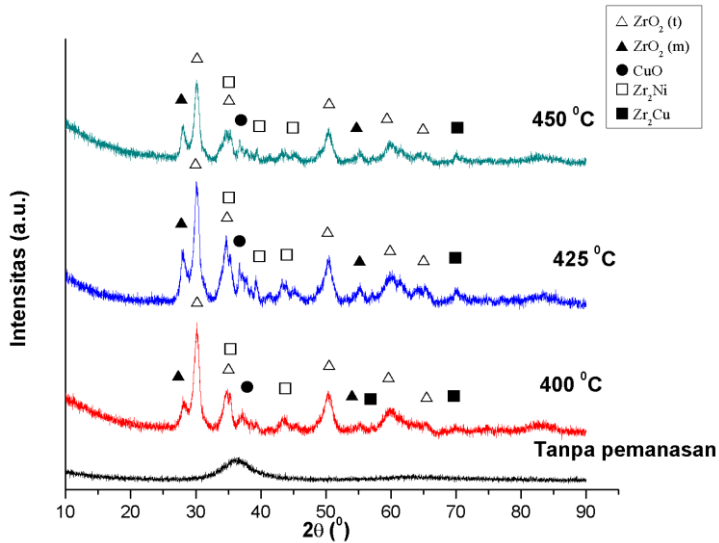
Dari hasil konstanta laju oksidasi maka dapat ditentukan besarnya energi aktivasi dengan menggunakan persamaan (2.5). Hasil dari konstanta laju oksidasi dihubungkan dengan temperatur sesuai hukum Arrhenius yaitu hubungan grafik $\ln K_p$ dengan $1/T$. sesuai pada lampiran. Sehingga didapatkan nilai energi aktivasi untuk paduan $Zr_{64.5}Cu_{17}Ni_{11}Al_{7.5}$ adalah 1.504eV dan paduan $Zr_{69.5}Cu_{12}Ni_{11}Al_{7.5}$ adalah 0.917eV. Nilai energi aktivasi menandakan energi minimum yang dibutuhkan agar terjadinya oksidasi. Dengan nilai energi aktivasi yang semakin kecil maka reaksi oksidasi semakin cepat berlangsung. Terlihat bahwa penambahan komponen paduan Zr mempengaruhi nilai energi aktivasi. Penambahan komposisi paduan Zr menyebabkan nilai energi aktivasi semakin kecil yang berarti terjadinya oksidasi semakin cepat. Hal ini berhubungan dengan konstanta laju oksidasi yang dihasilkan. Karena energi aktivasi berbanding terbalik dengan laju oksidasi maka dapat dilihat pada Tabel 4.3 bahwa untuk setiap nilai konstanta laju oksidasi pada setiap temperatur, paduan $Zr_{69.5}Cu_{12}Ni_{11}Al_{7.5}$ memiliki nilai konstanta laju oksidasi lebih tinggi dibandingkan paduan $Zr_{64.5}Cu_{17}Ni_{11}Al_{7.5}$. Semakin tinggi energi minimum yang diperlukan untuk bereaksi, maka semakin lambat reaksi yang terjadi (Naimah, 2009).

4.3.3 Analisa X-Ray Diffraction (XRD)

Dari perlakuan oksidasi yang dilakukan saat pengujian TGA, maka akan diketahui produk oksida yang terbentuk pada sampel $\text{Zr}_{64.5}\text{Cu}_{17}\text{Ni}_{11}\text{Al}_{7.5}$ dan $\text{Zr}_{69.5}\text{Cu}_{12}\text{Ni}_{11}\text{Al}_{7.5}$ yang akan disajikan pada Gambar 4.5 dan Gambar 4.6.



Gambar 4.5 Pola Difraksi Sinar-X paduan $\text{Zr}_{64.5}\text{Cu}_{17}\text{Ni}_{11}\text{Al}_{7.5}$ setelah proses oksidasi dengan variasi temperatur



Gambar 4.6 Pola Difraksi Sinar-X paduan $\text{Zr}_{69.5}\text{Cu}_{12}\text{Ni}_{11}\text{Al}_{7.5}$ setelah proses oksidasi dengan variasi temperatur.

Diketahui pada Gambar 4.5 maupun Gambar 4.6 terbentuk produk oksida yaitu ZrO_2 (tetragonal) sebagai fasa dominan dan CuO serta ZrO_2 (monoklinik) sebagai fasa minor serta Zr_2Ni dan Zr_2Cu sebagai fasa intermetalik. Terlihat dari kedua gambar tersebut bahwa ZrO_2 lebih dominan dibandingkan fasa-fasa yang lain. Hal ini dikarenakan Zirkonium memiliki afinitas kimia yang tinggi dengan oksigen sehingga mudah bereaksi dengan oksigen membentuk oksida. Zirkonia (ZrO_2) merupakan fasa yang hanya stabil pada system Zr-O dan terdapat tiga jenis perubahan yaitu ZrO_2 monoklinik terbentuk di bawah temperatur 1000-1200 °C, ZrO_2 tetragonal stabil pada suhu yang lebih tinggi, dan ZrO_2 kubik stabil di atas suhu 1500 °C (Kai et.al, 2002).

Pada beberapa kondisi temperatur terlihat bahwa fasa amorf sudah perlahan mulai menghilang dengan ditandai munculnya fasa ZrO_2 di setiap variasi pemanasan. Peningkatan temperatur akan menyebabkan peningkatan energi termal yang diterima oleh bahan amorf. Peningkatan energi termal menyebabkan inti tumbuh dengan menarik atom-atom lain dari dari inti yang belum sempat tumbuh untuk mengisi tempat kosong pada kisi yang akan dibentuk. Dengan meningkatnya energi termal yang diterima oleh bahan amorf, maka pertumbuhan kristal berjalan terus hingga didapatkan transformasi akhir yaitu dari amorf menjadi kristal.

Fasa intermetalik yang terbentuk menandakan bahwa pada temperatur di antara 400-450 $^{\circ}\text{C}$ sampel paduan Zirkonium mengalami kristalisasi. Hal ini menguatkan pada hasil dari kurva DSC yaitu temperatur kristalisasi dari setiap paduan terjadi pada suhu 400-450 $^{\circ}\text{C}$.

Terbentuknya produk oksida CuO sebagai fasa minor terkait dengan komposisi unsur paduan Cu yang sedikit. Pembentukan fasa CuO sebagai fasa minor tidak terlepas dari afinitas kimia yang dimiliki Cu lebih rendah dibandingkan dengan Zr dalam paduan gelas metalik. Ion Cu dan elektron bergerak ke arah luar dan ion oksigen bergerak ke arah dalam. Reaksi ini terjadi di dalam lapisan oksida. Selama oksidasi Cu berdifusi secara dominan ke luar, sedangkan oksigen ke dalam (Kim et.al, 2008).

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, maka dapat diperoleh kesimpulan sebagai berikut.

1. Temperatur pemanasan mempengaruhi reaksi oksidasi yang terjadi pada paduan amorfus berbasis Zirkonium.
2. Kinetika oksidasi pada paduan amorfus berbasis Zirkonium mengikuti hukum parabolik dan laju oksidasi meningkat dengan penambahan temperatur. Konstanta laju oksidasi dan energi aktivasi merupakan parameter terjadinya oksidasi.
3. Fasa-fasa yang terbentuk selama proses oksidasi yaitu terbentuk produk oksida ZrO_2 (tetragonal) sebagai fasa dominan serta ZrO_2 (monoklinik) dan CuO sebagai fasa minor serta terbentuk fase intermetalik Zr_2Ni dan Zr_2Cu .
4. Pembentukan lapisan oksida terjadi karena lapisan oksida awal yang terbentuk merupakan lapisan kompak (tak berpori) sehingga ion-ion logam dapat berdifusi menembus lapisan oksida menuju bidang batas oksida-udara, dan di perbatasan oksida-udara inilah logam-logam bereaksi dengan oksigen dan menambah tebal lapisan oksida yang telah ada.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penulisan tugas akhir ini disarankan untuk pengembangan penelitian lebih lanjut adalah sebagai berikut.

1. Pengujian DSC sampai temperatur 500°C sulit untuk mengidentifikasi kinetika kristalisasi karena kurva yang terbentuk belum mencapai 100% terjadinya kristalisasi. Penggunaan temperatur di atas temperatur 500°C sangat disarankan.
2. Perlu dilakukan pengujian SEM (*Scanning Electron Microscopy*) untuk mengetahui morfologi lapisan oksida yang terbentuk.

DAFTAR PUSTAKA

- Afiati, Zulina. 2009. **Karakterisasi Difraksi Sinar-X Nano-Brucite dan Nano-Periclase Hasil Kopresipitasi Dengan Perilaku Pemanasan Dan Penggilingan**. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Atkins, P.W. 1999. **Kimis Fisik Jilid 2 (Edisi Keempat)**. Jakarta: Erlangga.
- Anna. V. Nikulina, et.al. 1996. **Zirconium Alloy E635 As A Material for Fuel Rod Cladding and Other Components of VVER and RBMK Cores**. ASTM, STP 1295, 785.
- Cahyadi, W. 2006. **Penentuan Konstanta Laju Penurunan Kadar Iodrat dalam Garam Beriodium**. Jurnal Teknologi dan Bahan Pangan, XVII (1), pp. 38-43.
- Callister, J. W. 2007. **Materials Science and Engineering An Introduction Seven Edition**. USA: John Wiley and Sons, Inc.
- Castellan, G. 1982. **Physical Chemistry 3rd Edition**. New York:General Graphic Service.
- Chan, R.W. & P. Haasen. 1992. **Material Science and Technology, Characterization of Materials** .Journal of Materials, 2A.
- Cheadle B.A. 1975. **Physical Metallurgy of Zr Alloys**. Chalk River National Laboratory, Doc.No.
- Dwinda. 2006. **Analisis Fasa Kristal Pada Bahan Gelas Metalik Berbasis Zirkonium Pada Suhu 440-480 °C**.
- E. Tenckhoff. 1988. **Deformation Mechanism, Texture, and Anisotropy in Zirconium and Zirconium Alloys vol.966**. Philadelphia: ASTM.

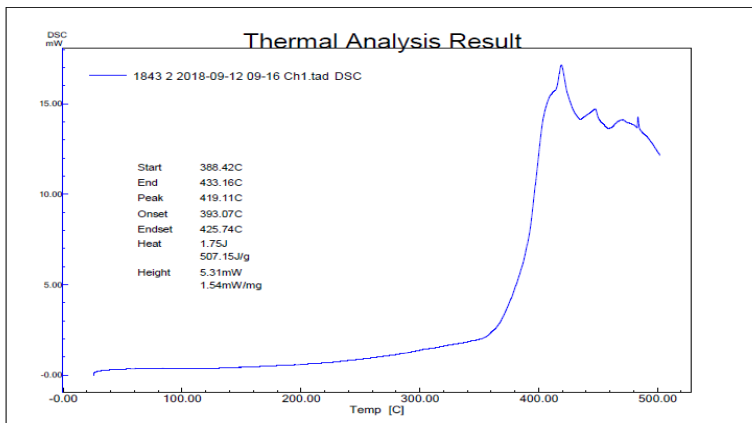
- Evans, U.R. 1960. **The Corrosion and Oxidation of Metals**. Edward Arnold:London.
- Gebert, A. et. al. 1998, **Effect Oxygen on Phase Formation and The Stability of Slowly Cooled Zr-Cu-Ni-Al Metallic Glasses**, Acta Mater 46, 5475-5482.
- Hauffe, K. 1965. **Oxidation of Metals**. Plenum Press:New York.
- Inoue. 2001. **Material Science Engineering**. A304-306.
- K. Fujita, T. Hashimoto, W. Zhang, H. Kimura, and A. Inoue. **Abstract of 12th International Conference on Rapidly Quenched and Metastable Materials** (August 22-26, 2005), p. 148.
- Kai, W., Hsieh, H.H., Nieh, T.G., Kawamura, Y. **Oxidation Behaviour of Zr-Cu-Ni-Al Amorphous Alloy in Air at 300-425 °C**. Intermetallics, Vol.10, hal 1265-1270. 2002.
- Kim, C.W., Jeong, H.G., Lee, D.B. **Oxidation Of Zr₆₅Al₁₀Ni₁₀Cu₁₅ Bulk Metallic Glass**. Materials Letters, Vol.62, hal. 584-586. 2008.
- Klement W., Willens R.H., Duwez P, Nature 187, 869 (1960).
- Kofstad, P. 1972. **Nonstoichiometry, Diffusion, and Electrical Conductivity in Binary Metal Oxides**. Wiley:New York.
- Kwela, Z.N. 2006. **Alkali Fusion Processes for Recovery of Zirconia and Zirconium from Zircon Sand**. Afrika Selatan:University of Pretoria.
- Latif, Chaironi. 2014. **Pengaruh Variasi Temperatur Kalsinasi pada Struktur dalam Sintesis Silika**. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Mark McKinnon. 2014. **Thermogravimetric Analysis (TGA) & Differential Scanning Calorimetry**. University of Maryland.
- Martono, Y., Sari, Y.E.P. & Hidarto, J. 2014. **Penggunaan Model Arrhenius Untuk Pendugaan Massa Simpan Produk**

- Minuman Kemasan Berdasarkan Kandungan Vitamin C.** Rekayasa Bahan Pangan, pp. 50-62.
- Munawaroh Fatimatul. 2009. **Perilaku Oksidasi $Zr_{69.5}Cu_{12}Ni_{11}Al_{7.5}$ pada Temperatur 440-480°C di Udara.**
- Naimah Khafidotun. 2009. **Persamaan Arrhenius dan Energi Aktivasi.** Artikel Kimia: Universitas Negeri Semarang
- Podder, T. K., Dicker, A. P., Hutapea, P., and Yu, Y., 2012, “**A Novel Curvilinear Approach for Prostate Seed Implantation,**” J. Med. Phys., 39(4), pp. 1887–1892.
- Poernomo, Henry. 2012. **Informasi Umum Zirkonium.** Yogyakarta : Badan Tenaga Nuklir Nasional Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan.
- Pratapa, Suminar. 2004. **Bahan Kuliah Difraksi Sinar-X.** Surabaya: Jurusan Fisika FMIPA ITS.
- Simpson J.W. 1995. **Nuclear Power from Underseas to Outer Space.** La Grange Park, IL: American Nuclear Society.
- Sudaryanto S., Utari Ning. 2010. **Mengenal Sifat-Sifat Material.** Bandung : Darpublic.
- Triwikantoro, Hidayat N. **Kinetika Kristalisasi Bahan Gelas Metalik Berbasis Zirkonium.** Jurnal Fisika Indonesia, No: 25 vol VIII. Edisi Desember 2004 ISSN: 1410-2994, hal. 28-37.
- Triwikantoro, Sukendar Soni. **Nanokristalisasi Material Amorf $Zr_{69.5}Cu_{12}Ni_{11}Al_{7.5}$ antara Temperatur Transisi Glass (Tg) dan Temperatur Kristalisasi (Tx).** Jurnal Fisika dan Aplikasinya, Vol. 3 No. 1, Januari 2007.
- Triwikantoro, Toma D., Meuris M., Koester U. 1999. **Oxidation of Zr – Based Metallic Glasses in Air.** Journal of nanocrystalline solids 250-252. 719-723.
- Wang, J.G., dkk., J. Mater. Res., 15(3), 798-807 (2000).

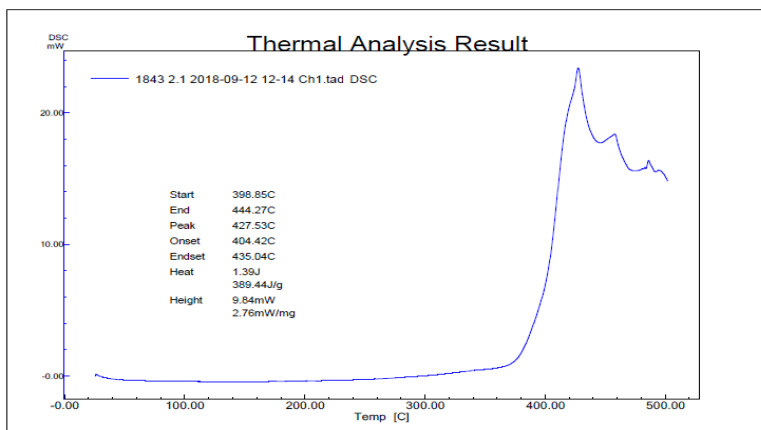
Y. Yokoyama, K. Fukaura, and A. Inoue. **Materials Transformation.** **45** (2004) 1672.

LAMPIRAN A

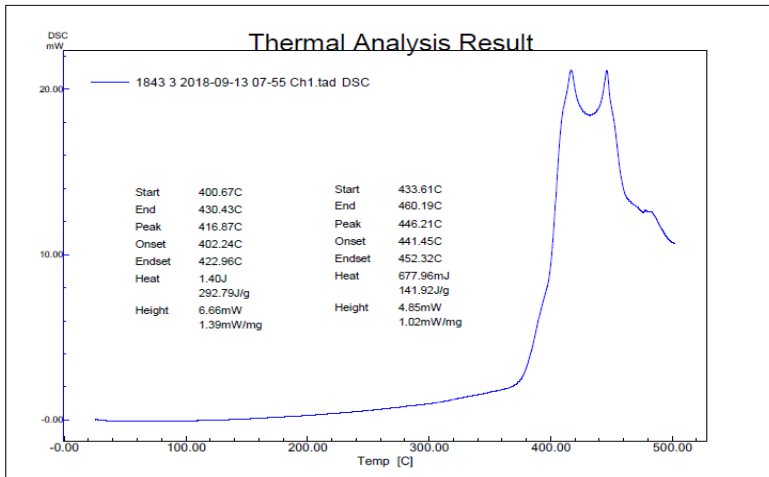
Kurva DSC



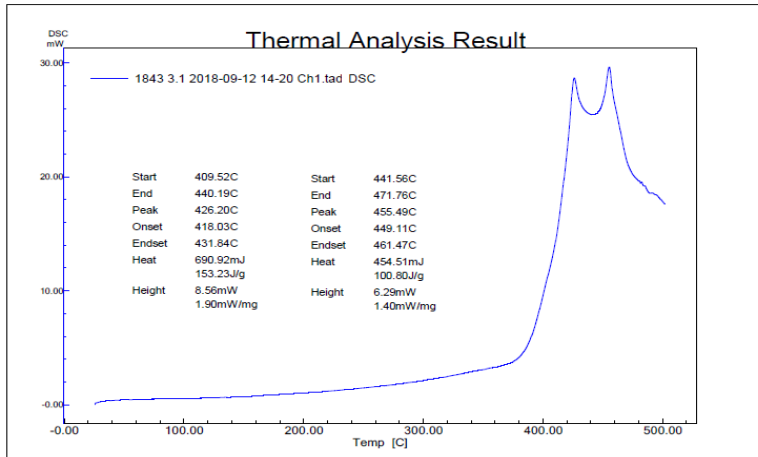
Gambar A.1. Kurva DSC paduan $Zr_{68}Cu_{14}Ni_{11}Al_7$ dengan laju pemanasan $5^{\circ}C$



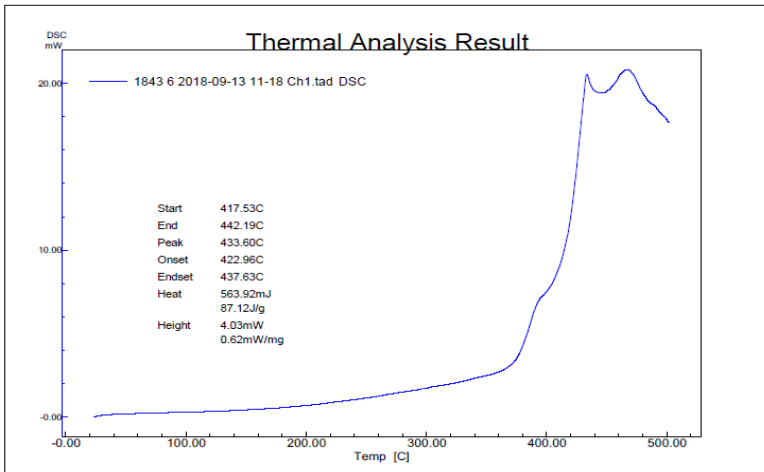
Gambar A.2. Kurva DSC paduan $Zr_{68}Cu_{14}Ni_{11}Al_7$ dengan laju pemanasan $10^{\circ}C$



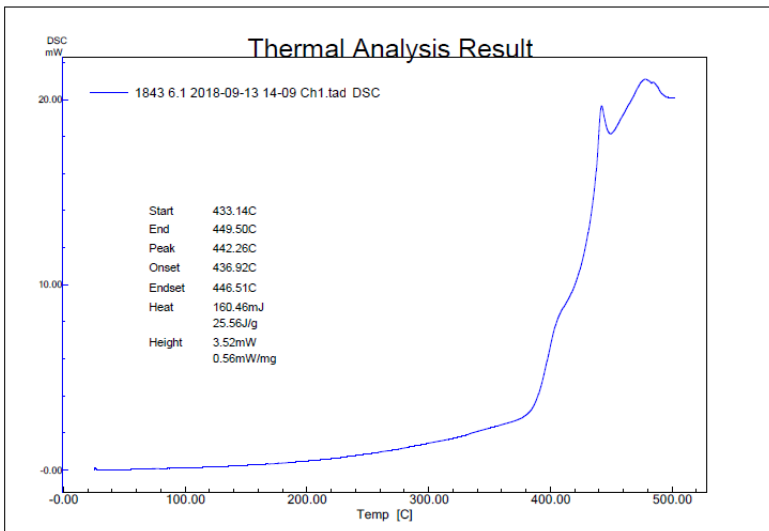
Gambar A.3. Kurva DSC paduan $Zr_{64.5}Cu_{17}Ni_{11}Al_{7.5}$ dengan laju pemanasan $5^{\circ}C$



Gambar A.4. Kurva DSC paduan $Zr_{64.5}Cu_{17}Ni_{11}Al_{7.5}$ dengan laju pemanasan $10^{\circ}C$



Gambar A.5. Kurva DSC paduan $Zr_{69.5}Cu_{12}Ni_{11}Al_{7.5}$ dengan laju pemanasan $5^{\circ}C$

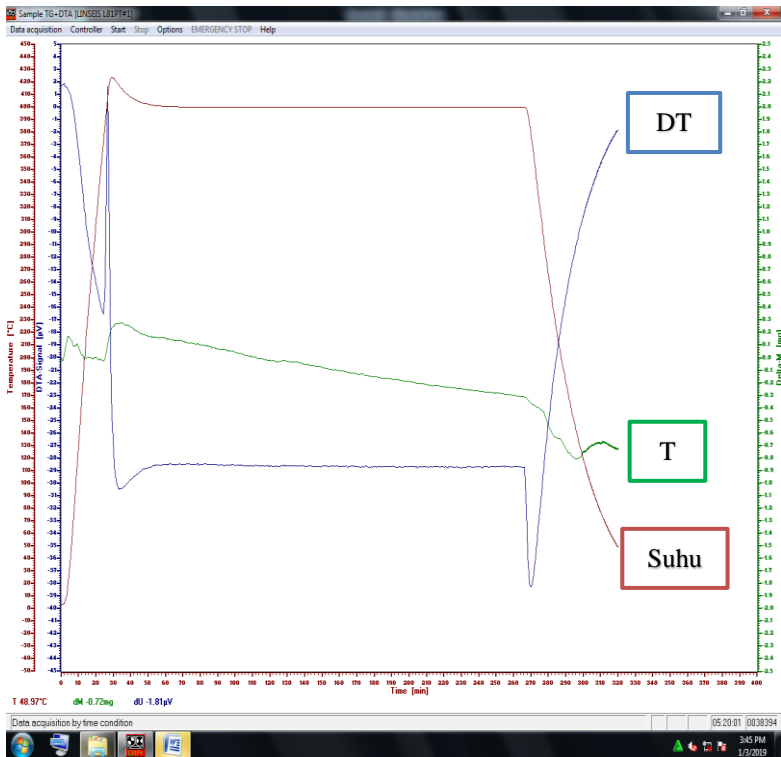


Gambar A.5. Kurva DSC paduan $Zr_{69.5}Cu_{12}Ni_{11}Al_{7.5}$ dengan laju pemanasan $5^{\circ}C$

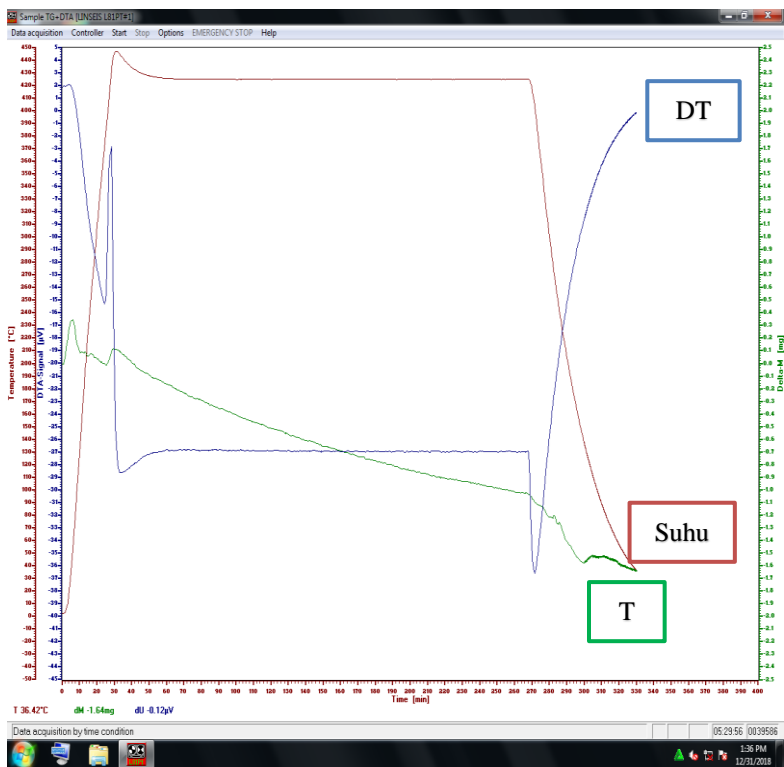
“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LAMPIRAN B

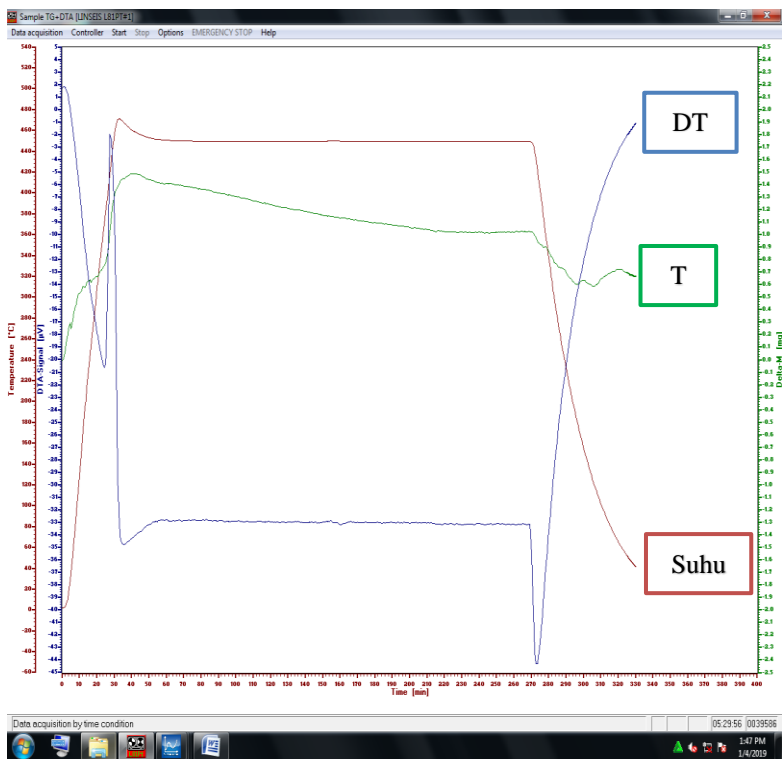
Kurva DTA/TG



Gambar B.1. Kurva DTA/TG paduan $Zr_{64.5}Cu_{17}Ni_{11}Al_{7.5}$ pada temperatur 400°C.



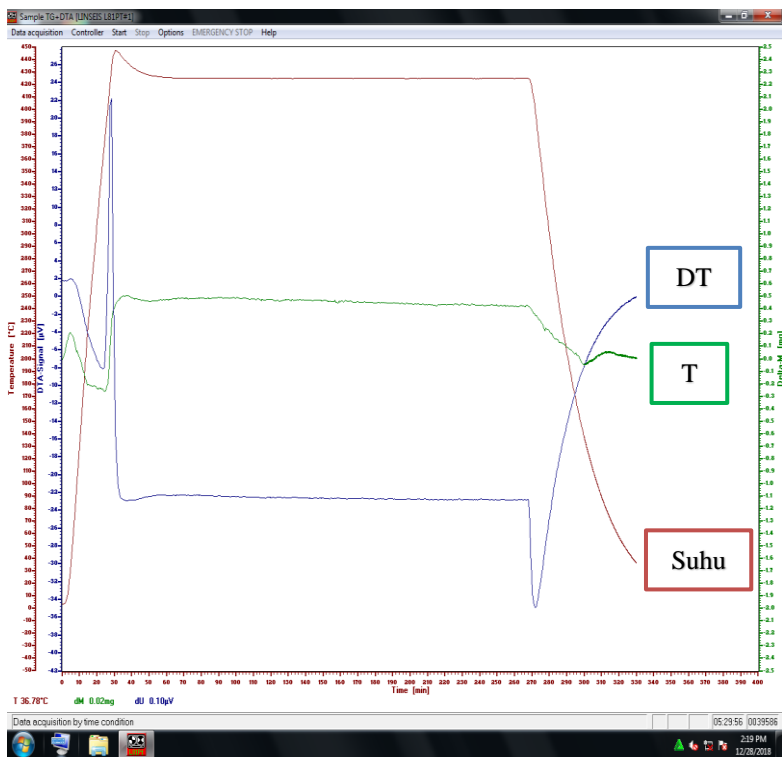
Gambar B.2. Kurva DTA/TG paduan $\text{Zr}_{64.5}\text{Cu}_{17}\text{Ni}_{11}\text{Al}_{7.5}$ pada temperatur 425°C.



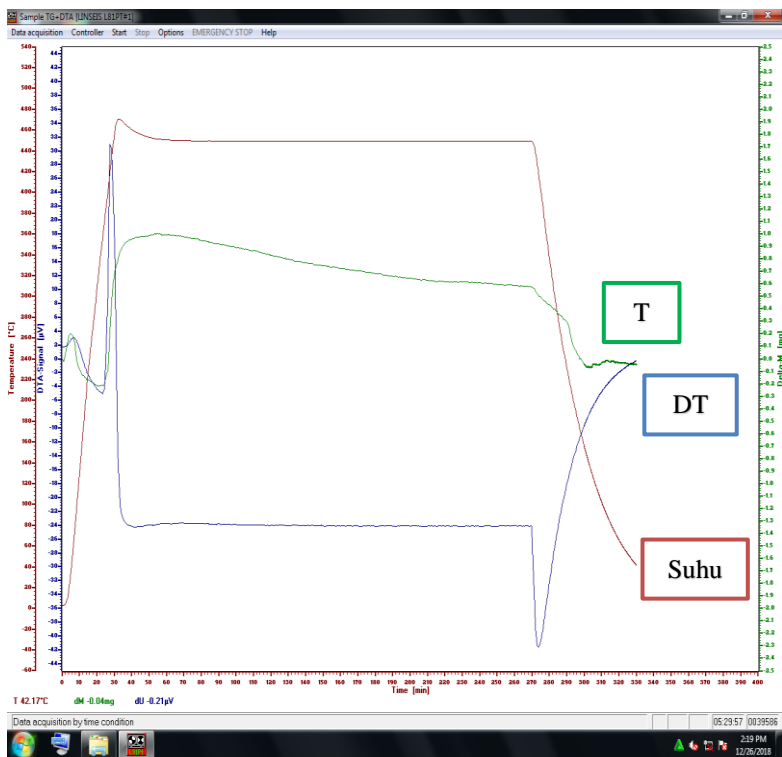
Gambar B.3. Kurva DTA/TG paduan $\text{Zr}_{64.5}\text{Cu}_{17}\text{Ni}_{11}\text{Al}_{7.5}$ pada temperatur 450°C .



Gambar B.4. Kurva DTA/TG paduan $\text{Zr}_{69.5}\text{Cu}_{12}\text{Ni}_{11}\text{Al}_{7.5}$ pada temperatur 400°C.



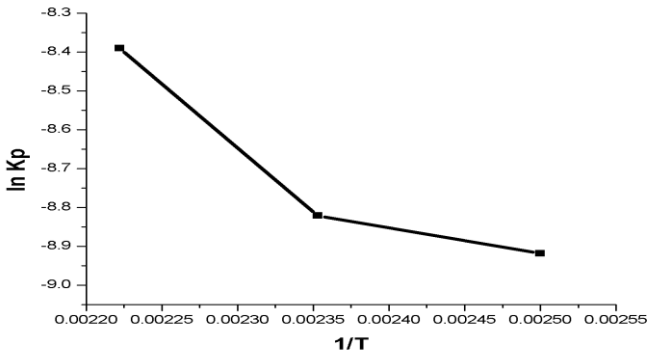
Gambar B.5. Kurva DTA/TG paduan $\text{Zr}_{69.5}\text{Cu}_{12}\text{Ni}_{11}\text{Al}_{7.5}$ pada temperatur 425°C .



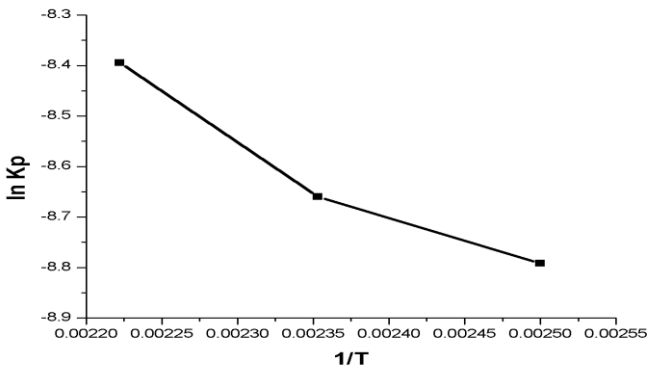
Gambar B.6. Kurva DTA/TG paduan $\text{Zr}_{69.5}\text{Cu}_{12}\text{Ni}_{11}\text{Al}_{7.5}$ pada temperatur 450°C.

LAMPIRAN C

Kurva hubungan $\ln K_p$ versus $1/T$



Gambar C.1 Grafik hubungan $\ln K_p$ versus $1/T$ pada paduan $Zr_{64.5}Cu_{17}Ni_{11}Al_{7.5}$



Gambar C.2 Grafik hubungan $\ln K_p$ versus $1/T$ pada paduan $Zr_{69.5}Cu_{12}Ni_{11}Al_{7.5}$

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BIOGRAFI PENULIS



Penulis dengan nama “Romdhoni Graha Pribadi” merupakan anak kedua dari 2 bersaudara dari pasangan Dwidja Nugraha dan Agustini Tri Purwandari yang lahir di Kota Sidoarjo pada 28 Januari 1996. Penulis telah menempuh pendidikan antara lain di TK PIG Malang, SDN Lowokwaru 2 Malang, SMP Negeri 5 Sidoarjo, dan SMA Negeri 2 Sidoarjo. Penulis sekarang tercatat sebagai mahasiswa di Departemen Fisika, Fakultas Ilmu Alam, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penulis kuliah di Departemen Fisika ini menggeluti bidang minat Fisika Material. Penulis sangat menyukai kegiatan yang berhubungan dengan bidang olahraga dan otomotif. Sejak SMP hingga Kuliah penulis aktif dalam kegiatan, ekstrakurikuler, dan organisasi yang berhubungan dengan olahraga dan otomotif.

Harapan besar penulis adalah karya ini dapat bermanfaat bagi orang lain dan bagi diri penulis sendiri sebagai sarana pengembangan potensi dan kualifikasi diri. Penulis menerima segala kritik dan saran mengenai penelitian yang penulis lakukan ini. Kritik dan saran dapat dikirim melalui email: romdhoni_graha@yahoo.co.id.